

**CARLOS HENRIQUE FARIAS DOS SANTOS**

**MOVIMENTO COORDENADO DE SISTEMAS  
VEÍCULO-MANIPULADOR SUBMARINOS  
UTILIZANDO TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA  
ARTIFICIAL E SISTEMAS HÍBRIDOS.**

**FLORIANÓPOLIS**

**2006**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MOVIMENTO COORDENADO DE SISTEMAS  
VEÍCULO-MANIPULADOR SUBMARINOS  
UTILIZANDO TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA  
ARTIFICIAL E SISTEMAS HÍBRIDOS.**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

**CARLOS HENRIQUE FARIAS DOS SANTOS**

Florianópolis, Junho de 2006.

# **MOVIMENTO COORDENADO DE SISTEMAS VEÍCULO-MANIPULADOR SUBMARINOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SISTEMAS HÍBRIDOS.**

**CARLOS HENRIQUE FARIAS DOS SANTOS**

‘Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Controle, Automação e Informática Industrial*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

---

Prof. Raul Guenther, Dr.

Orientador

---

Prof. Alexandre Trofino Neto, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Prof. Raul Guenther, Dr. - UFSC

Presidente

---

Prof. Edson De Pieri, Dr. - Co-orientador - UFSC

---

Prof. Glauco Augusto de Paula Caurin, Dr. - USP

*Ao nosso Criador, que torna tudo isso possível...*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores Raul Guenther e Edson Roberto De Pieri pela orientação e amizade demonstrada durante a realização deste trabalho.

Aos professores Glauco Caurin, Guilherme Bittencourt e José Paulo da Cunha, membros da banca examinadora, pela participação, comentários, críticas e valiosas sugestões.

Aos colegas e professores dos Departamentos de Automação e Sistemas e de Engenharia Mecânica que tornaram possível este trabalho.

Aos grandes amigos Frei Daniel Heinzein, Gabriela Zorzo, Rodrigo Sumar, Jerusa Marchi, Leonardo Taglieti, Alexandre Campos, e Antônio Carlos Valdiero que estiveram presentes nos momentos mais importantes desta jornada.

Aos meus pais Diraldo Rodrigues dos Santos e Lígia Farias dos Santos e minha irmã Lígia Karla pelo carinho, motivação e amor.

Um agradecimento especial a minha esposa Maristela pelo incansável apoio, estímulo, compreensão e amor demonstrados em todos os momentos desta caminhada.

A todas aquelas pessoas que não estão explicitamente incluídas, mas que de alguma forma contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

Resumo da Tese apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

**MOVIMENTO COORDENADO DE SISTEMAS  
VEÍCULO-MANIPULADOR SUBMARINOS UTILIZANDO  
TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SISTEMAS  
HÍBRIDOS.**

**Carlos Henrique Farias dos Santos**

Junho/2006

Orientador: Raul Guenther D.Sc.

Co-orientador: Edson Roberto De Pieri, Dr.

Área de Concentração: Robótica.

Palavras-chave: Sistemas Veículo-Manipulador Submarinos, Cinemática diferencial, Cadeia Cinemática Virtual, Inteligência Artificial, Sistemas Híbridos.

Número de Páginas: 194

Este documento apresenta a cinemática diferencial de sistemas veículo-manipulador submarinos (SVMS), onde a modelagem cinemática destes sistemas é realizada utilizando o método de Davies de forma sistemática. A partir desta modelagem, propõe-se a solução da redundância do SVMS utilizando o método das restrições cinemáticas. Este método pode cancelar o movimento do veículo e simultaneamente, reorientar o mesmo na direção da corrente submarina por economia energética. Todavia, este método limita o espaço de trabalho apenas ao movimento do manipulador. Isto pode acarretar em posturas singulares quando o movimento deste manipulador não for suficiente para executar a dada tarefa. Neste sentido, propõe-se que o veículo mova-se de acordo com um índice de desempenho de forma a evitar que tais posturas ocorram e que permaneça parado quando este índice encontra-se afastado da singularidade. Para tanto, apresenta-se duas técnicas de inteligência artificial (IA) para incorporar conhecimento ao movimento do veículo. Por fim, quando apenas o movimento do veículo não for eficiente para evitar singularidades, as técnicas de IA são complementadas através de uma abordagem baseada na teoria de sistemas híbridos.

Abstract of Thesis presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree  
of Doctor in Electrical Engineering.

# **COORDINATE MOVEMENT OF UNDERWATER VEHICLE-MANIPULATOR SYSTEMS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES AND HYBRID SYSTEMS**

**Carlos Henrique Farias dos Santos**

June/2006

Advisor: Raul Guenther, D.Sc.

Co-Advisor: Edson Roberto De Pieri, Dr.

Area of Concentration: Robotics.

Key words: Underwater Vehicle-Manipulator Systems, Differential Kinematics, Virtual Kinematic Chains, Artificial Intelligence, Hybrid Systems.

Number of Pages: 194

This document presents the Underwater Vehicle-Manipulator Systems (UVMS) differential kinematics, where the kinematic model of such systems using the Davies method in a systematic form is developed. With this modeling, the UVMS redundancy resolution is based on the kinematic constraints method, which cancels the vehicle's movement. However, this method limits the system workspace to the manipulator movement. In consequence of that, singular postures could happen when the manipulator movement is not enough to execute a given task. In view of this, the vehicle movement to avoid such postures according a performance index is proposed and keep it at rest when the index has values away from singularities. To this end, two artificial intelligence (AI) techniques are presented, that incorporate knowledge to the vehicle. Finally, when the vehicle's movement is not enough to the singularity avoidance, the AI techniques are complemented by an approach based on hybrid systems theory.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação e Relevância do Trabalho . . . . .	1
1.1.1	Robótica submarina . . . . .	1
1.1.2	Inteligência Artificial . . . . .	6
1.1.3	Sistemas Híbridos . . . . .	6
1.2	Objetivo da Tese . . . . .	7
1.3	Organização da Tese . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Modelagem Cinemática de Sistemas Veículo-Manipulador</b>	<b>10</b>
2.1	Representação do movimento instantâneo de um veículo através de helicóides . .	10
2.1.1	O conceito de heligiro . . . . .	10
2.1.2	Transformação de coordenadas de helicóides . . . . .	14
2.1.3	Representação do movimento de um veículo . . . . .	16
2.1.4	Movimento de um manipulador serial . . . . .	22
2.2	Modelagem cinemática de um <i>SVM</i> . . . . .	26
2.3	Conclusões . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Métodos Utilizados para a Solução da Redundância</b>	<b>29</b>
3.1	Introdução ao controle cinemático . . . . .	29
3.2	Controle cinemático aplicado aos <i>SVMs</i> . . . . .	30
3.3	Algumas técnicas para solução da redundância de robôs . . . . .	32
3.3.1	Pseudoinversa . . . . .	32



3.3.2	Prioridade da Tarefa ( <i>Task Priority</i> ) . . . . .	35
3.3.3	Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades . . . . .	36
3.3.4	Mínimos Quadrados Amortecidos ( <i>Damped Least Square</i> ) . . . . .	36
3.3.5	Resolução da redundância através de um sistema não-redundante . . . . .	38
3.4	Conclusões . . . . .	41
<b>4</b>	<b>O Método das Restrições Cinemáticas</b>	<b>42</b>
4.1	Cinemática Direta do <i>SVMS</i> . . . . .	42
4.2	Cinemática Inversa do <i>SVMS</i> . . . . .	46
4.3	Restrições Cinemáticas . . . . .	46
4.4	Conclusões . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Conceitos Cinemáticos Qualitativos</b>	<b>50</b>
5.1	Introdução . . . . .	50
5.2	Alguns índices de desempenho cinemático . . . . .	51
5.2.1	Manipulabilidade . . . . .	51
5.2.2	Número condicionamento . . . . .	51
5.2.3	Mínimo valor singular . . . . .	52
5.2.4	Menores do Jacobiano . . . . .	52
5.3	Proposta de um índice de desempenho cinemático normalizado . . . . .	52
5.4	O conceito de agente reflexivo . . . . .	54
5.4.1	Introdução . . . . .	54
5.4.2	Implementação do comportamento reflexivo . . . . .	55
5.5	O conceito de regulação cinemática . . . . .	56
5.5.1	A regulação reduzida do desempenho . . . . .	58
5.6	Conclusões . . . . .	59
<b>6</b>	<b>Solução da Redundância dos Sistemas Veículo-Manipulador Submarinos através de uma Máquina Funcional Reativa</b>	<b>60</b>
6.1	Introdução . . . . .	60

6.2	Fundamentos teóricos . . . . .	62
6.2.1	A unidade computacional básica . . . . .	62
6.2.2	Estabilidade . . . . .	63
6.2.3	Aproximação universal de funções . . . . .	64
6.3	A máquina funcional reativa . . . . .	64
6.3.1	Estrutura geral . . . . .	65
6.3.2	Abstração de uma superfície de polarização . . . . .	66
6.3.3	Controle reativo . . . . .	68
6.3.4	O polarizador como agente reativo . . . . .	69
6.3.5	A topologia de premonição . . . . .	71
6.3.6	Distribuição da redundância . . . . .	72
6.3.7	A Máquina Funcional Reativa aplicada ao SVMS . . . . .	73
6.3.8	Estudo de caso . . . . .	73
6.4	Conclusões . . . . .	75
<b>7</b>	<b>Movimento Coordenado dos Sistemas Veículo-Manipulador Submarinos usando Sis-</b>	
	<b>temas Nebulosos Híbridos</b>	<b>76</b>
7.1	Introdução . . . . .	76
7.2	Fundamentos teóricos . . . . .	78
7.2.1	Conjuntos nebulosos . . . . .	78
7.2.2	Estrutura geral dos SNs . . . . .	79
7.2.3	Raciocínio nebuloso . . . . .	80
7.3	A máquina sequencial de Moore . . . . .	81
7.4	Sistemas nebulosos híbridos . . . . .	82
7.4.1	Representação do conhecimento através de uma Histerese . . . . .	82
7.4.2	Arquitetura supervisora . . . . .	84
7.4.3	Arquitetura compacta . . . . .	88
7.4.4	Controle do SVMS . . . . .	90
7.4.5	Arquitetura projetiva . . . . .	90

7.5	Conclusões . . . . .	94
<b>8</b>	<b>Cinemática Híbrida</b>	<b>96</b>
8.1	Introdução . . . . .	96
8.2	Preliminares . . . . .	97
8.3	Modelos de evitamento de singularidades . . . . .	98
8.4	O autômato híbrido . . . . .	99
8.5	Simulação da cinemática híbrida . . . . .	102
8.6	Exemplo de aplicação num manipulador robótico 2P4R . . . . .	105
8.6.1	Estado inicial . . . . .	106
8.6.2	Estado cinemático 1 . . . . .	106
8.6.3	Estado cinemático 2 . . . . .	107
8.6.4	Estado cinemático 3 . . . . .	107
8.6.5	Análise de simulação . . . . .	108
8.7	Conclusões . . . . .	113
<b>9</b>	<b>Resultados de Simulações</b>	<b>114</b>
9.1	Modelos para simulação . . . . .	114
9.2	Trajetórias no espaço da tarefa . . . . .	116
9.2.1	Trajetórias retilíneas . . . . .	116
9.2.2	Trajetórias circulares . . . . .	118
9.3	Estratégias de controle cinemático simuladas . . . . .	119
9.3.1	Pseudoinversa ponderada . . . . .	119
9.3.2	Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades . . . . .	121
9.3.3	Máquina funcional reativa . . . . .	123
9.3.4	Sistemas Nebulosos-Híbridos . . . . .	123
9.4	Simulações . . . . .	124
9.4.1	Trajetória retilínea repetitiva . . . . .	125
9.4.2	Trajetória circular repetitiva . . . . .	132

9.5	Estratégia Híbrida aplicada ao SVMS: a cinemática híbrida como abordagem complementar. . . . .	139
9.5.1	Simulações . . . . .	140
9.6	Conclusões . . . . .	143
<b>10</b>	<b>Conclusões e Perspectivas</b>	<b>144</b>
10.1	Conclusões . . . . .	144
10.2	Principais contribuições . . . . .	145
10.3	Perspectivas . . . . .	146
<b>A</b>	<b>Fundamentos Teóricos</b>	<b>148</b>
A.1	O método de Davies . . . . .	148
A.1.1	Lei da circulação das malhas . . . . .	148
A.1.2	Solução da cinemática no espaço das juntas . . . . .	150
A.2	O conceito de cadeia cinemática virtual . . . . .	152
A.3	Representação da Cadeia Cinemática por Grafos . . . . .	153
A.3.1	Conceitos básicos . . . . .	154
A.3.2	Exemplo de aplicação ao robô <i>RRRR</i> . . . . .	156
<b>B</b>	<b>Modelagem cinemática convencional</b>	<b>161</b>
B.1	Veículo-Manipulador planar . . . . .	165
<b>C</b>	<b>Modelagem de um Sistema Veículo-Manipulador Submarino planar usando o método de Davies</b>	<b>170</b>
C.1	Estrutura cinemática do SVMS aplicando o método de Davies . . . . .	179
C.2	Conclusões . . . . .	184

# Lista de Figuras

1.1	Sistema veículo-manipulador submarino VORTEX/PA10 . . . . .	4
1.2	Veículo submarino com dois manipuladores . . . . .	5
1.3	Veículo submarino com dois manipuladores . . . . .	5
2.1	Movimento combinado de rotação e translação: heligiro . . . . .	11
2.2	Componentes do heligiro para um submarino em geral . . . . .	12
2.3	Tranformação de coordenadas helicóides . . . . .	14
2.4	Cadeia cinemática aberta . . . . .	17
2.5	Cadeia cinemática representando o movimento do veículo submarino . . . . .	18
2.6	Orientação do veículo em relação ao sistema-C . . . . .	20
2.7	Cadeia cinemática do robô manipulador serial PUMA. . . . .	23
2.8	Posição de referência do robô PUMA. . . . .	25
2.9	Estrutura cinemática do $SVM$ espacial . . . . .	27
3.1	Laços cinemático e dinâmico . . . . .	31
3.2	Manipulador redundante $RRRP$ . . . . .	34
4.1	Aplicação da técnica de Davies ao $SVMS$ . . . . .	43
4.2	Digrafo de acoplamento $G_C$ do $SVMS$ . . . . .	43
4.3	Digrafo de movimento $G_M$ do $SVMS$ . . . . .	44
6.1	Estrutura da unidade computacional . . . . .	62
6.2	Máquina Funcional Reativa. . . . .	65

6.3	Superfície de polarização . . . . .	66
6.4	Grandezas imperativas da superfície de polarização. . . . .	67
6.5	Grandezas da superfície de polarização. . . . .	68
6.6	Máquina de estados finitos do veículo. . . . .	70
6.7	Máquina funcional reativa com premonição . . . . .	71
6.8	Função reativa. . . . .	73
6.9	Máquina funcional reativa com duas camadas. . . . .	74
6.10	Máquina funcional reativa com três camadas. . . . .	74
6.11	Máquina funcional reativa com premonição. . . . .	74
6.12	Máquina funcional reativa com premonição e três entradas. . . . .	75
7.1	Estrutura clássica de um sistema nebuloso . . . . .	79
7.2	Máquina seqüencial de Moore . . . . .	81
7.3	Comportamento do veículo descrito por uma histerese. . . . .	83
7.4	Arquitetura supervisória . . . . .	84
7.5	Índice de desempenho $\gamma$ . . . . .	85
7.6	Variação do índice de desempenho $\dot{\gamma}$ . . . . .	85
7.7	$\gamma$ antes do início do movimento . . . . .	86
7.8	$\gamma$ após o início do movimento . . . . .	87
7.9	Memória . . . . .	87
7.10	Arquitetura compacta . . . . .	89
7.11	Memória . . . . .	89
7.12	Arquitetura projetiva . . . . .	91
7.13	Componente da velocidade do efetuator . . . . .	92
8.1	Autômato híbrido de 4 estados . . . . .	101
8.2	Autômato híbrido de 3 estados . . . . .	102
8.3	Diagrama de simulação da cinemática híbrida. . . . .	104
8.4	Cadeia cinemática fechada do manipulador 2P4R . . . . .	105
8.5	Visão do manipulador 2P4R durante a tarefa. . . . .	109

8.6	Evolução dos desempenhos dos estados e norma do erro de posição do efetuador para 3 estados . . . . .	110
8.7	Posição e velocidade das juntas prismáticas $x, y$ e da junta de orientação $\phi$ para 3 estados . . . . .	110
8.8	Posição e velocidade das juntas $q_1, q_2$ e $q_3$ para 3 estados. . . . .	111
8.9	Evolução dos desempenhos dos estados e norma do erro de posição do efetuador . . . . .	112
8.10	Posição e velocidade das juntas prismáticas $x, y$ e da junta de orientação $\phi$ para 4 estados . . . . .	112
8.11	Posição e velocidade das juntas $q_1, q_2$ e $q_3$ para 4 estados. . . . .	113
9.1	Sistema Veículo-Manipulador Submarino no plano XY . . . . .	115
9.2	Máquina funcional reativa com premonição. . . . .	123
9.3	Arquitetura supervisória . . . . .	123
9.4	Arquitetura compacta . . . . .	124
9.5	Arquitetura projetiva . . . . .	124
9.6	Visão planar da tarefa retilínea. . . . .	125
9.7	Pseudoinversa ponderada: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo . . . . .	126
9.8	Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo . . . . .	126
9.9	Histórico do desempenho $\gamma$ : (a) Pseudoinversa ponderada, (b) Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades . . . . .	127
9.10	(a) histórico do desempenho $\gamma$ e do agente $\alpha$ , (b) saída da máquina funcional reativa . . . . .	127
9.11	Máquina Funcional Reativa: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo . . . . .	128
9.12	(a) histórico do desempenho $\gamma$ , (b) ativação da arquitetura supervisória . . . . .	129
9.13	Arquitetura supervisória: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo . . . . .	129
9.14	Arquitetura compacta: (a) histórico do desempenho $\gamma$ (b) ativação da arquitetura compacta . . . . .	130
9.15	Arquitetura compacta: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo. . . . .	130

9.16	Arquitetura projetiva: (a) histórico do desempenho $\gamma$ , (b) posição do veículo, (c) velocidade do veículo. . . . .	131
9.17	Visão planar da tarefa circular. . . . .	132
9.18	Pseudoinversa ponderada: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo. . . .	133
9.19	Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo. . . . .	133
9.20	Histórico do desempenho $\gamma$ : (a) Pseudoinversa Ponderada, (b) Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades . . . . .	134
9.21	(a) histórico do desempenho $\gamma$ e do agente $\alpha$ , (b) saída da Máquina Funcional Reativa. . . . .	134
9.22	Máquina Funcional Reativa: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo. . .	135
9.23	(a) histórico do desempenho $\gamma$ , (a) ativação supervisória . . . . .	136
9.24	Arquitetura supervisória: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo. . . .	136
9.25	(a) histórico do desempenho $\gamma$ , (b) ativação compacta . . . . .	137
9.26	Arquitetura compacta: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo. . . . .	137
9.27	Histórico do desempenho $\gamma$ . . . . .	138
9.28	Arquitetura projetiva: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo. . . . .	138
9.29	Sistema de evitamento de singularidades representado como um autômato híbrido	140
9.30	(a) visão planar da tarefa, (b) histórico do desempenho $\gamma$ . . . . .	141
9.31	(a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo . . . . .	141
9.32	Manipulador: (a) posições das juntas, (b) velocidades das juntas . . . . .	142
A.1	Mecanismo de quatro barras . . . . .	149
A.2	Manipulador serial plano $RRRR$ . . . . .	157
A.3	Digrafo $G_C/G_M$ do manipulador serial plano $RRRR$ . . . . .	157
A.4	Cadeia cinemática $RRRR + PPR$ . . . . .	158
A.5	Digrafo $G_C/G_M$ da cadeia $RRRR + PPR$ . . . . .	158
B.1	Sistema veículo-manipulador submarino. . . . .	162
B.2	Diagrama cinemático do sistema veículo-manipulador planar. . . . .	166



C.1	Estrutura do veículo-manipulador planar. . . . .	171
C.2	Diagrama esquemático do <i>SVM</i> planar. . . . .	171
C.3	Diagrama cinemático do veículo-manipulador planar. . . . .	172
C.4	Posição de referência do <i>SVM</i> planar. . . . .	173
C.5	Sistema veículo-manipulador planar. . . . .	179
C.6	Digrafo do sistema veículo-manipulador planar . . . . .	180

# Lista de Tabelas

7.1	Base das regras do estado de movimento. . . . .	86
7.2	Base das regras de transição. . . . .	88
7.3	Base de regras do ciclo da histerese . . . . .	89
7.4	Base de regras projetiva . . . . .	93
7.5	Base de regras para: $\omega$ =habilitado e $\$_{e_i}=N$ . . . . .	93
7.6	Base de regras para: $\omega$ =habilitado, $\$_{e_i}=Z$ e $\$'_{e_i}=N/P$ . . . . .	93
7.7	Base de regras para: $\omega$ =habilitado, $\$_{e_i}=P$ . . . . .	94
7.8	Base de regras para: $\omega$ =desabilitado . . . . .	94

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação e Relevância do Trabalho

#### 1.1.1 Robótica submarina

O oceano ocupa dois terços da superfície terrestre e tem um grande efeito no futuro da humanidade. Cerca de 37% da população do planeta vive a uma distância máxima de 100 km do oceano [Cohen et al., 1997]. Entretanto, ainda não foi alcançado um desenvolvimento tecnológico para explorar o oceano a grandes profundidades e suas abundantes reservas minerais e biológicas. Por exemplo, estima-se que existam 2 bilhões de toneladas de magnésio no fundo do Oceano Pacífico próximo das Ilhas Havainas [Yuh, 2000]. O Brasil está entre os poucos países que dominam todo o ciclo de perfuração submarina em águas profundas e ultraprofundas (maiores que 2 mil metros). Em algumas partes do mundo, já foram feitas perfurações em lâminas d'água superiores a 2 mil metros e há projetos para dobrar esta marca. A Petrobras detém o recorde mundial de perfuração exploratória no mar, com um poço em lâmina d'água de 2.777 metros. Existem poços, na Bacia de Campos, produzindo petróleo em lâmina d'água de até 1.877 metros [Petrobras, 2004]. Neste sentido, a robótica submarina pode ser útil para um melhor entendimento do mar e de outras características ambientais, protegendo os oceanos dos poluentes e explorando-os de forma eficiente. A seguir, destacam-se algumas das potenciais aplicações dos robôs submarinos.

- *Científica*: Mapeamento submarino; Rápida resposta para Oceanografia e eventos geotérmicos.
- *Ambiental*: Monitoramento (ex: poluentes, hidrocarbono, radiação); Remediação ambiental; Inspeção de estruturas submarinas.
- *Militar*: Desativação e instalação de minas; sensoramento submarino.
- *Mineração Oceânica e Indústria Petrolífera*: Construção e manutenção de estruturas submarinas.
- *Outras Aplicações*: Inspeção de plantas nucleares; Inspeção de cascos e tanques internos de embarcações; Inspeção e instalação de cabos de potência elétrica e de comunicação; Entreterimento turístico submarino.

A maior parte dos robôs submarinos comerciais são operados remotamente através de cabos, denominados de veículos de operação remota (*Remotely Operated Vehicles - ROVs*). O uso de submersíveis e *ROVs* é frequentemente limitado a poucas aplicações devido ao alto custo operacional, fadiga de operadores e aspectos de segurança. A demanda por tecnologias robóticas submarinas avançadas está em crescimento e eventualmente conduzirá a automação completa dos veículos robóticos submarinos, ou seja, robôs submarinos autônomos, frequentemente chamados de veículos submarinos autônomos (*Autonomous Underwater Vehicles - AUVs*).

Neste sentido, todos os veículos autônomos, sejam subaquáticos ou não, devem ser capazes de garantir: (1) sensoriamento do ambiente, (2) interpretar as informações destes sensores para refinar o conhecimento sobre sua posição e estrutura do ambiente no qual está inserido e (3) planejar uma rota de uma posição inicial até uma posição final na presença ou não de obstáculos [Cox and Wilfong, 1990].

Recentemente, várias pesquisas ampliaram a autonomia dos veículos e minimizaram a necessidade da presença de operadores.

Entretanto, várias características do ambiente subaquático dificultam a implementação de tecnologias submarinas, mesmo com o alto grau de desenvolvimento das tecnologias que levaram o homem à Lua ou que pretendem levá-lo a Marte.

Os principais fatos que dificultam o controle de robôs submarinos incluem: muitas não-linearidades, dinâmica variável com o comportamento do robô, uma variedade de distúrbios imensuráveis causados por correntes oceânicas multi-direcionais e que podem ser somados aos efeitos das ondas e dos ventos se as águas forem de baixa profundidade [Fossen, 1998], mudanças do centro de gravidade e de flutuação devido ao movimento de manipuladores os quais podem causar distúrbios no corpo do veículo.

Para contornar tais dificuldades, várias alternativas de controladores avançados são propostas na literatura, tais como Controle por Modos Deslizantes [Yoerger and Slotine, 1985]; [Healey and Lienard, 1987], Controle Não-Linear [Nakamura and Savant, 1992], Controle Adaptativo ([Goheen and Jeffery, 1990]; [Yuh, 1992]; [Yuh, 1996] [Cristi et al., 1991]; [Tabaai et al., 1994]), Controle por Redes Neurais ([Yuh, 1994], [Yuh, 1990]) e Controle Fuzzy ([DeBitetto, 1994]; [Kato, 1995]; [Guo et al., 2003]).

Em Sistemas Veículo-Manipulador Submarinos (*SVMS*), para robôs grandes, os efeitos do movimento do braço manipulador podem ser desprezados e o sistema pode ser desacoplado. Para robôs menores, os efeitos de acoplamento tornam-se significativos e precisam ser considerados no projeto geral do controlador. Com um manipulador acoplado ao veículo, o sistema torna-se um sistema com grande grau de redundância, onde o veículo move-se continuamente e o controle do manipulador precisa oferecer alto grau de desempenho, em termos de velocidade e precisão. Assim, existem muitos desafios em problemas de engenharia para veículos submarinos com manipuladores.

A redundância tem despertado o interesse na aplicação destes sistemas devido à sua habilidade de realizar movimentos em ambientes restritos. Outra razão é a habilidade extra que estes robôs redundantes possuem em evitar obstáculos, limites das juntas e singularidades.

Podem-se citar alguns trabalhos sobre a coordenação de movimentos de sistemas veículo-manipulador ([Mahesh et al., 1991]; [McLain et al., 1992]; [Antonelli and Chiaverini, 1998]; e [de Wit et al., 1998]). Mahesh et al. (1991) desenvolveram um esquema de controle coordenado usando uma aproximação de tempo discreto do modelo dinâmico do *SVMS*, com controle simultâneo do veículo e do manipulador e compensação de erros do efetuador final resultantes do movimento do veículo. McLain et al. (1996) conduziram experimentos no Instituto de Pesquisas

Aquáticas de Monterrey Bay (MBARI) usando o veículo OTTER e observaram que o efeito da interação dinâmica entre o braço robótico e o veículo pode ser significativa. Canudas-de-Wit et al. (1998) desenvolveram um controlador robusto não-linear para compensar os efeitos de acoplamento devido ao braço manipulador. Eles usaram as diferentes características dinâmicas do veículo e do braço para projetar um controlador através da teoria das perturbações singulares. A Fig. 1.1 exibe o sistema redundante usado por Canudas, onde o *SVMS* VORTEX/PA10 é composto por um robô manipulador PA10 com sete graus de liberdade *7 dof (degree of freedom)* montado sobre uma plataforma de navegação VORTEX.

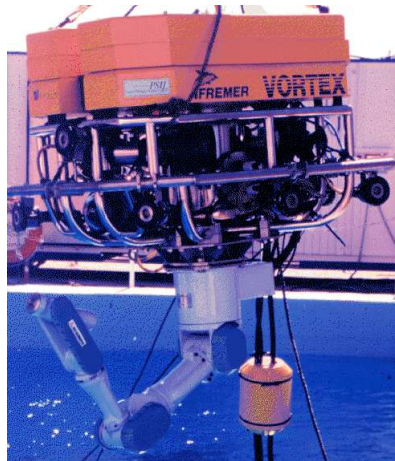


Figura 1.1: Sistema veículo-manipulador submarino VORTEX/PA10

As Figs. 1.2 e 1.3 exibem outros tipos de *SVMS* com dois manipuladores montados sobre o veículo submarino.

Antonelli e Chiaverini (1998) propuseram um esquema para a resolução da redundância de um sistema veículo-manipulador submarino, baseado na estratégia de controle cinemático *Singular Robust Task-Priority*, usando um vetor projetor para o espaço nulo.



Figura 1.2: Veículo submarino com dois manipuladores

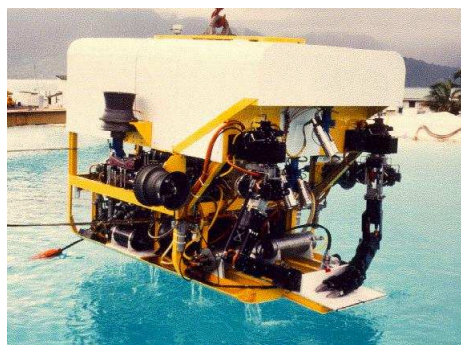


Figura 1.3: Veículo submarino com dois manipuladores

### 1.1.2 Inteligência Artificial

A construção de robôs autônomos é um dos desafios que a inteligência artificial (IA) está enfrentando com sucesso nos últimos anos [Barreto, 2001].

Para tanto, a autonomia destes robôs está relacionada à capacidade de manifestar conhecimento humano através do aprendizado ou de adaptação às mudanças do ambiente. Logo, o robô deve ser capaz de cumprir uma dada tarefa com elevado grau de independência operacional. Entre as técnicas de IA capazes de alcançar tal objetivo, estão as redes neurais artificiais (RNAs), agentes autônomos (AAs) e lógica nebulosa.

De forma equivalente, a implementação da autonomia dos SVMS representa uma série de desafios. Entre eles, a coordenação de movimento entre veículo e manipulador, o qual é o principal objetivo desta tese. Neste trabalho utilizam-se as técnicas de AAs e lógica nebulosa para alcançar esse objetivo.

### 1.1.3 Sistemas Híbridos

De uma forma geral, o termo "sistemas híbridos" pode ser utilizado para designar sistemas com comportamento definido por entidades ou processos de características distintas. Neste trabalho, o termo híbrido refere-se a combinações ou composições de partes contínuas e discretas, e entende-se um "sistema dinâmico híbrido" como um sistema dinâmico onde o comportamento de interesse é determinado pela interação de dinâmicas contínuas e discretas.

As características híbridas manifestam-se em uma grande diversidade complexas aplicações de engenharia, incluindo: controle de tráfego aéreo, controle automotivo, automação da manufatura, controle de processos químicos e robótica [Davoren and Nerode, 1995]. Além disso, consideráveis avanços em ciência da computação e teoria de controle direcionaram esforços na pesquisa de sistemas que combinam partes contínuas e discretas [Antsaklis et al., 1995, Antsaklis et al., 1998, Engell and Sivan, 2004, Tomlin et al., 2000].

A solução da redundância dos SVMS pode manifestar uma característica híbrida quando interpreta-se seu movimento como uma seqüência de estados discretos. Assim, cada um destes estados é responsável por um segmento deste movimento.



Esta interpretação híbrida do movimento permite a aplicação de técnicas de sistemas híbridos, como forma de superar limitações que podem se manifestar durante a execução de uma tarefa. Uma destas limitações, principal interesse deste trabalho, refere-se ao problema de posturas singulares no manipulador.

Neste sentido, as singularidades são evitadas através da troca das juntas responsáveis, por juntas que estejam afastadas de posturas singulares. Esta forma de solução configura um sistema híbrido, pois envolve a troca entre estados discretos, onde cada um destes estados contém uma parte contínua, representada pela cinemática do SVMS.

## 1.2 Objetivo da Tese

O problema a ser enfrentado consiste na forma de acionamento do veículo, quando o mesmo parte do repouso procurando evitar que o manipulador montado sobre ele alcance uma configuração singular. A técnica responsável por este acionamento deve realizá-lo de forma suficientemente suave pois de outra forma, acontece uma propagação de descontinuidades nas velocidades das juntas subsequentes da cadeia cinemática. Quando o manipulador encontra-se afastado da singularidade o veículo retorna ao repouso. Para tanto, esta tese propõe técnicas de acionamento do SVMS que conciliam as teorias de IA e de Sistemas Híbridos. Esta conciliação é obtida em dois níveis de abordagem:

1. as técnicas de IA manipulam variáveis contínuas e discretas;
2. as técnicas de IA além de utilizarem a abordagem 1 são complementadas por uma interpretação do movimento do SVMS como um sistema híbrido, i.e. ocorre uma mudança de um modelo cinemático para outro quando, em determinadas condições especiais, a abordagem 1 não for suficiente para garantir a continuidade de operação do sistema.

## 1.3 Organização da Tese

Este trabalho está dividido como segue.

No capítulo 2, aborda-se a modelagem dos sistemas veículo-manipulador submarinos *SVMS* utilizando a teoria de helicóides, onde é aplicada uma cadeia cinemática para representar o movimento do veículo submarino.

No capítulo 3, discute-se algumas estratégias convencionais para a resolução de sistemas robóticos redundantes.

No capítulo 4, desenvolve-se o modelo do *SVMS* aplicando uma cadeia virtual para desenvolvimento do método das Restrições Cinemáticas e ressalta-se sua limitação, motivo de desenvolvimento das técnicas apresentadas nesta Tese.

No capítulo 5 são apresentados conceitos cinemáticos qualitativos, com o objetivo de impor uma forma conveniente do veículo reagir diante de condições em que seu movimento é solicitado para evitar posturas singulares no manipulador. Estes conceitos cinemáticos são baseados em fundamentos de sistemas elétricos de potência e são posteriormente incorporados a técnicas de inteligência artificial.

No capítulo 6 é apresentada uma técnica denominada Máquina Funcional Reativa. Esta máquina agrega conceitos de controle reativo, regulação cinemática e uma topologia denominada de *Premonição*. Esta topologia reforça o mapeamento entre as entradas e a saída da máquina funcional.

No capítulo 7 o conceito de Sistema Nebuloso Híbrido é apresentado. Este sistema utiliza entradas contínuas e discretas para uma representação de conhecimento que será aplicado ao controle do movimento do veículo. Este controle é apresentado em três arquiteturas: supervisória, compacta e projetiva.

No capítulo 8 é apresentado o formalismo dos sistemas dinâmicos híbridos e a metodologia para utilizá-los de forma complementar à ação das técnicas de IA apresentadas.

No capítulo 9 os resultados de simulação apresentados são analisados e comparados com técnicas tradicionais baseadas na Pseudoinversa.

As conclusões, principais contribuições e perspectivas desta tese são apresentadas no capítulo 10.

O apêndice A apresenta os fundamentos teóricos que consistem no Método de Davies, o conceito das cadeias cinemáticas virtuais e a representação das cadeias cinemáticas através de

grafos.

Por fim, os apêndices B e C apresentam as modelagens de um sistema veículo manipulador submarino planar utilizando as abordagens convencional e de Davies respectivamente.

## Capítulo 2

# Modelagem Cinemática de Sistemas Veículo-Manipulador

*Este capítulo apresenta a aplicação de uma nova abordagem na modelagem cinemática de sistemas robóticos veículo-manipulador (SVM). Esta abordagem utiliza os fundamentos da teoria de helicóides.*

### 2.1 Representação do movimento instantâneo de um veículo através de helicóides

#### 2.1.1 O conceito de heligiro

Nesta seção é apresentada a descrição da representação do movimento instantâneo de um submarino, considerado como um corpo rígido, através de um helicóide. O helicóide é um elemento geométrico composto por uma reta direcionada (*eixo*) e por um parâmetro escalar com unidades de comprimento  $h$  (*passo*) [Hunt, 1987].

O movimento instantâneo de um corpo rígido resulta da combinação de uma translação e uma rotação em torno de um sistema inercial, e pode ser descrito por um *heligiro* § [Hunt, 2000].

De acordo com o teorema de Mozzi [Ceccarelli, 2000], as velocidades dos pontos de um

corpo, em relação a um sistema de referência inercial  $O(X, Y, Z)$  podem ser representadas por uma rotação diferencial  $\omega$  em torno de um determinado eixo instantaneamente fixo, e por uma translação diferencial  $\tau$  ao longo do mesmo eixo agindo simultaneamente, como mostrado na Fig. 2.1. Ou seja, as velocidades podem ser representadas por um heligiro. Da mesma forma, o movimento instantâneo de um submarino pode ser descrito por um heligiro.

O eixo instantâneo do heligiro é denominado *eixo de helicóide* e a razão das magnitudes da velocidade translacional e angular é denominada *passo do helicóide*  $h = \|\tau\|/\|\omega\|$ .

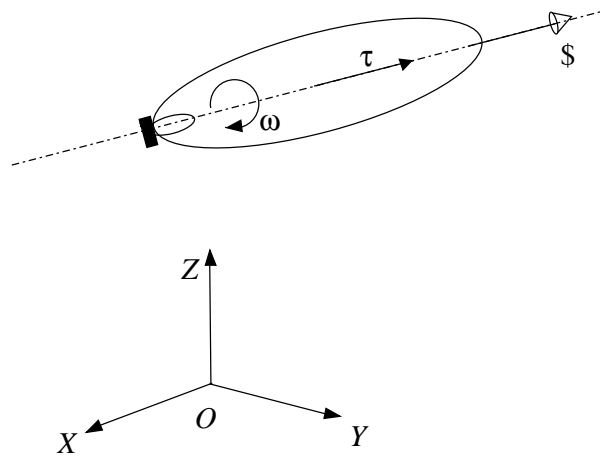


Figura 2.1: Movimento combinado de rotação e translação: heligiro

O heligiro em relação a um sistema inercial pode ser expresso por um par de vetores, *i.e.*  $\$ = (w; V_p)$ . O vetor  $w = (w_x, w_y, w_z) = (\mathcal{L}, \mathcal{M}, \mathcal{N})$  representa a velocidade angular do corpo com relação ao sistema inercial. O vetor  $V_p = (v_{px}, v_{py}, v_{pz}) = (\mathcal{P}^*, \mathcal{Q}^*, \mathcal{R}^*)$  representa a velocidade linear do corpo que coincide instantaneamente com a origem  $O$ , em relação ao sistema inercial.

No submarino mostrado na Fig. 2.2 nenhum ponto coincide instantaneamente com a origem  $O$ . Neste caso, pode-se imaginar uma extensão fictícia do submarino com um ponto  $p$  que, instantaneamente, coincide com a origem  $O$  (Fig. 2.2). Ou seja, o ponto  $p$  do submarino está instantaneamente na origem do sistema inercial e se move junto com o submarino.

A velocidade linear ( $V_p$ ) é formada por duas componentes: a) a velocidade paralela ao eixo de helicóide representada por  $\tau = h\omega$ ; e b) a velocidade normal ao eixo de helicóide representada

por  $S_o \times \omega$  onde  $S_o$  é o vetor posição de qualquer ponto no eixo de helicóide.

Desta forma,

$$V_p = S_o \times \omega + h\omega \quad (2.1)$$

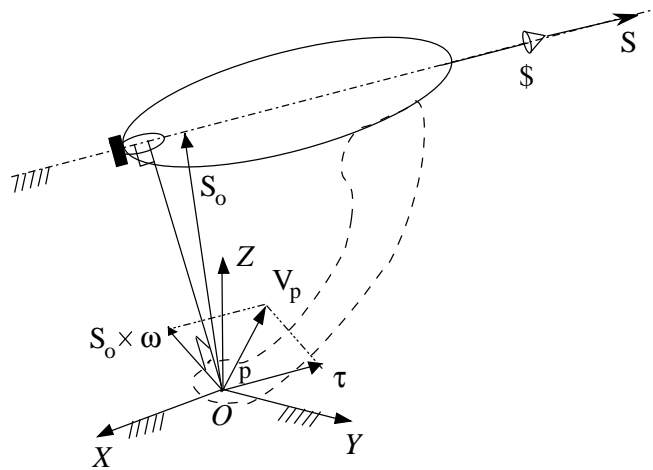


Figura 2.2: Componentes do heligiro para um submarino em geral

Um heligiro pode ser representado pela sua magnitude  $\Psi$  e pelo seu helicóide normalizado  $\hat{\$}$  por meio de

$$\$ = \hat{\$}\Psi. \quad (2.2)$$

A magnitude  $\Psi$  do heligiro é igual à magnitude da velocidade angular do corpo  $\|\omega\|$ , se o movimento é puramente rotativo, ou igual à magnitude da velocidade linear  $\|V_p\|$  do corpo se o movimento é puramente de translação. Quando o movimento do corpo combina rotação e translação a magnitude do heligiro é a magnitude da velocidade angular do corpo  $\|\omega\|$ .

Considerando um heligiro dado por  $\$ = (\omega; V_p)^T = (\mathcal{L}, \mathcal{M}, \mathcal{N}; \mathcal{P}^*, \mathcal{Q}^*, \mathcal{R}^*)^T$ , o seu helicóide normalizado correspondente  $\hat{\$}$  é definido por um par de vetores,  $(L, M, N)$  e  $(P^*, Q^*, R^*)$  dado por:

$$\hat{\$} = \begin{bmatrix} \mathcal{L}/\Psi \\ \mathcal{M}/\Psi \\ \mathcal{N}/\Psi \\ \mathcal{P}^*/\Psi \\ \mathcal{Q}^*/\Psi \\ \mathcal{R}^*/\Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \\ P^* \\ Q^* \\ R^* \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

onde o vetor  $(L, M, N)$  é um vetor unitário na direção do eixo de helicóide, designado como  $S$ , e de (2.1) pode-se verificar que o vetor  $(P^*, Q^*, R^*)$  é

$$\begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \\ R^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_o \times S + hS \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

onde o vetor  $(S_o \times S)$  determina o momento do eixo de helicóide em torno da origem do sistema de referência. Assim,

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \\ P^* \\ Q^* \\ R^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \\ S_o \times S + hS \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

Quando o heligiro representa um movimento de rotação pura, o passo do helicóide normalizado correspondente é nulo  $h = 0$ . Assim, o helicóide normalizado para este movimento é dado por

$$\hat{\$} = \begin{bmatrix} S \\ S_o \times S \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

O passo do helicóide normalizado que representa o movimento puramente de translação, é infinito  $h = \infty$ . Neste caso, o momento do eixo de helicóide em torno da origem é nulo

$(S_o \times S) = 0$ , e assim, o helicóide normalizado para este movimento é reduzido a

$$\hat{\$} = \begin{bmatrix} 0 \\ S \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Com frequência, é útil representar um heligiro em diferentes sistemas de coordenadas. Na modelagem de veículos subaquáticos, assim como em aeronaves e mísseis, é conveniente trabalhar com dois sistemas de referência: um fixo ao veículo, denominado de referencial do corpo ou referencial móvel e outro sistema fixo à Terra denominado de referencial inercial [Fossen, 1998]. Para tanto, é utilizada, como ferramenta, a transformação de coordenadas de helicóide. Esta ferramenta é apresentada na seção seguinte.

### 2.1.2 Transformação de coordenadas de helicóides

As componentes de um heligiro que descrevem o movimento de um submarino dependem do sistema de coordenadas onde este é representado. A relação entre a representação do heligiro em diferentes sistemas de coordenadas é dada pela matriz de transformação de coordenadas de helicóides descrita na sequência.

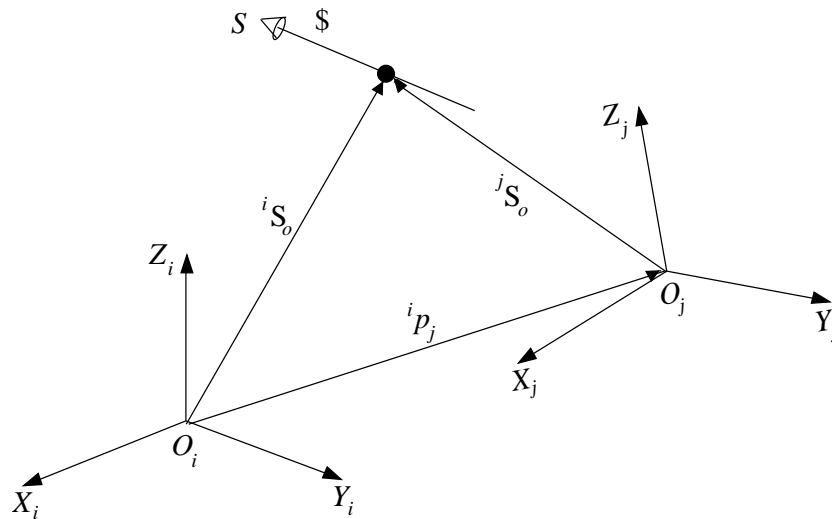


Figura 2.3: Tranformação de coordenadas helicóides



Sejam  $(X_j Y_j Z_j)$  e  $(X_i Y_i Z_i)$  os dois sistemas de interesse, apresentados na Fig.2.3. A posição da origem  $O_j$  relativa ao sistema  $(X_i Y_i Z_i)$  é dada por  ${}^i p_j$ , enquanto  ${}^i R_j$  é a matriz de rotação do sistema de coordenadas  $j$  para o sistema de coordenadas  $i$ . Seja o heligiro  $\$$  cuja representação no sistema  $i$  é  ${}^i \$$  e no sistema  $j$  é  ${}^j \$$ . Os helicóides normalizados correspondentes são  ${}^i \hat{\$}$  e  ${}^j \hat{\$}$ , respectivamente. De acordo com a definição de helicóide normalizado (2.5), tem-se

$${}^i \hat{\$} = \begin{bmatrix} {}^i S \\ {}^i S_o \times {}^i S + h {}^i S \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

onde  ${}^i S$  denota um vetor unitário ao longo da direção do eixo helicóide, representado no sistema  $i$ , enquanto  ${}^i S_o$  denota um vetor posição de um ponto qualquer ao longo de eixo helicóide, representado no sistema  $i$ .

Da mesma forma,

$${}^j \hat{\$} = \begin{bmatrix} {}^j S \\ {}^j S_o \times {}^j S + h {}^j S \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

onde os vetores unitários  $S$  são relacionados por

$${}^i S = {}^i R_j {}^j S, \quad (2.10)$$

e as posições de um ponto sobre o eixo de helicóide são relacionadas por

$${}^i S_o = {}^i p_j + {}^i R_j {}^j S_o. \quad (2.11)$$

A partir das Eqs. (2.10) e (2.11), tem-se

$${}^i S_o \times {}^i S = {}^i p_j \times ({}^i R_j {}^j S) + {}^i R_j ({}^j S_o \times {}^j S). \quad (2.12)$$

Substituindo as equações (2.10) e (2.12) na Eq. (2.8), tem-se

$${}^i \hat{\$} = \begin{bmatrix} {}^i R_j {}^j S \\ {}^i R_j ({}^j S_o \times {}^j S) + {}^i p_j \times ({}^i R_j {}^j S) + h {}^i R_j {}^j S \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

A Eq. (2.13) pode ser escrita na seguinte forma matricial:

$${}^i\hat{\$} = [{}^iT_j]^j \hat{\$}, \quad (2.14)$$

sendo,

$$[{}^iT_j] = \left[ \begin{array}{c|c} [{}^iR_j]_{3 \times 3} & [0]_{3 \times 3} \\ \hline [\mathcal{S}({}^i\vec{p}_j)]_{3 \times 3} [{}^iR_j]_{3 \times 3} & [{}^iR_j]_{3 \times 3} \end{array} \right], \quad (2.15)$$

onde  $\mathcal{S}({}^i\vec{p}_j)$  é uma matriz anti-simétrica representando o vetor  ${}^ip_j(p_x, p_y, p_z)$  da origem do sistema  $i$  para a origem do sistema  $j$  representados no sistema  $i$  [Tsai, 1999].

Como  $\mathcal{S}({}^i\vec{p}_j)$  é anti-simétrica e  ${}^iR_j$  é ortogonal, a matriz de transformação inversa pode ser escrita como,

$$[{}^iT_j]^{-1} \triangleq [{}^jT_i] \triangleq \left[ \begin{array}{c|c} [{}^iR_j]_{3 \times 3}^T & [0]_{3 \times 3} \\ \hline [[\mathcal{S}({}^i\vec{p}_j)][{}^iR_j]]_{3 \times 3}^T & [{}^iR_j]_{3 \times 3}^T \end{array} \right]. \quad (2.16)$$

### 2.1.3 Representação do movimento de um veículo

Nesta seção descreve-se o movimento de um veículo através do movimento de uma cadeia cinemática aberta. Define-se como cadeia cinemática aberta um conjunto de elos ligados em série por  $n$  juntas através das quais ocorre o movimento relativo entre os elos (Fig.2.4).

Sejam  $\$i$   $i = 1, \dots, n$  os heligiros que descrevem o movimento relativo entre os elos, ou seja,  $\$1$  descreve o movimento da junta 1 (entre o elo  $A$  e a *base*),  $\$2$  descreve o movimento na

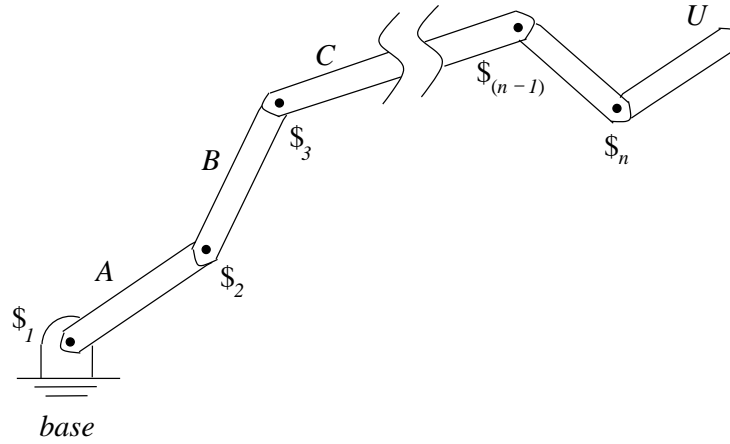


Figura 2.4: Cadeia cinemática aberta

junta 2 (entre o elo  $B$  e o elo  $A$ ),  $\$3$  descreve o movimento na junta 3 (entre o elo  $C$  e o elo  $B$ ), e assim por diante.

Neste caso, o movimento do último elo da cadeia ( $U$ ) em relação à base é dado por

$$\$_U = \sum_{i=1}^n \$i \quad (2.17)$$

Empregando a Eq.(2.2), resulta

$$\$_U = \sum_{i=1}^n \hat{\$}_i \Psi_i, \quad (2.18)$$

onde  $\hat{\$}_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  são os helicóides normalizados e  $\Psi_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  são as magnitudes dos heligiros.

No espaço tridimensional um veículo submarino possui seis graus de liberdade, da mesma forma que uma cadeia cinemática com seis juntas quando cada uma delas tem um único grau de liberdade.

Neste caso, chamando de  $V$  o elo correspondente ao veículo, seu movimento em relação à terra (base), representado pelo heligiro  $\$_V$  pode ser dado por

$$\$_V = \sum_{i=1}^6 \hat{\$_{vi}} \Psi_{vi}, \quad (2.19)$$

Com isto verifica-se que o movimento de um submarino pode ser descrito através de uma cadeia cinemática com seis juntas quando cada uma delas tem um único grau de liberdade.

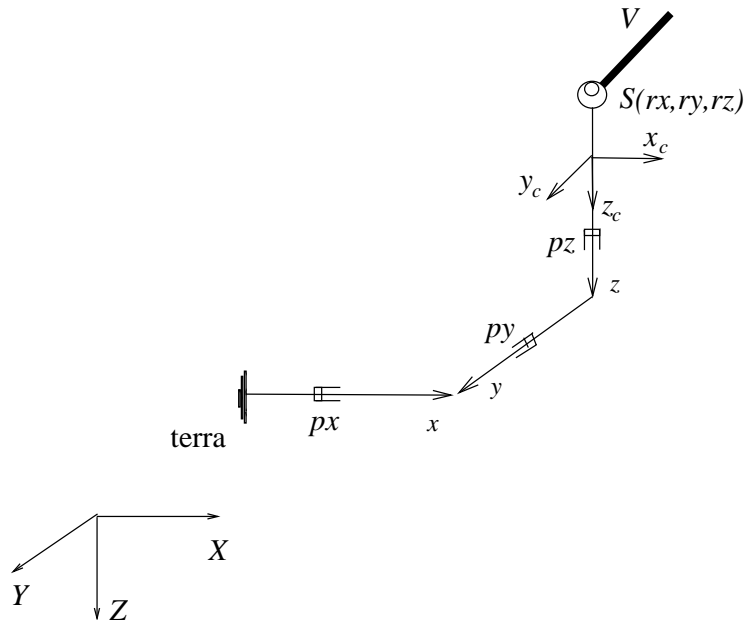


Figura 2.5: Cadeia cinemática representando o movimento do veículo submarino

Uma cadeia cinemática que possibilita a descrição do movimento do veículo é a cadeia *PPPS* ortogonal (Fig.2.5), com três juntas prismáticas (*p*) ortogonais entre si, aqui denominadas *px*, *py* e *pz*, e uma junta esférica (*S*), representada instantaneamente por três juntas de rotação consecutivas, com movimento em torno de três eixos ortogonais, aqui denominadas *rx*, *ry*, *rz*.

A cadeia cinemática começa na junta *px*, que possibilita o movimento entre a terra e o primeiro elo da cadeia, e termina com a junta de ligação esférica *S*, através da qual ocorre o movimento entre o último elo e o elo que representa o veículo (*V*).

Convém ainda destacar que, na Fig.2.5, o sentido do eixo *z* encontra-se orientado para baixo devido à superfície da água ser frequentemente adotado como marco inicial de profundidade alcançada por veículos submarinos.

Uma representação simplificada dos heligiros da cadeia cinemática pode ser conseguida através da escolha de um sistema-*C* fixo ao elo que une a junta *pz* com a junta esférica (*S*), com os eixos *xc*, *yc* e *zc* paralelos aos eixos *X*, *Y* e *Z*, respectivamente (Fig. 2.5).

A partir da definição de helicóide normalizado (Eq.2.4), a representação dos helicóides normalizados representados no sistema  $C$  resulta:

$${}^C\hat{\$}_{rx} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; {}^C\hat{\$}_{ry} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; {}^C\hat{\$}_{rz} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; {}^C\hat{\$}_{px} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; {}^C\hat{\$}_{py} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; {}^C\hat{\$}_{pz} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

A independência linear entre os helicóides normalizados na Eq. (2.20) fica explícita. Portanto, é possível representar o movimento completo do veículo submarino através de uma combinação linear de movimentos linearmente independentes, ou seja

$${}^C\$_V = {}^C\hat{\$}_{px}\Psi_{px} + {}^C\hat{\$}_{py}\Psi_{py} + {}^C\hat{\$}_{pz}\Psi_{pz} + {}^C\hat{\$}_{rx}\Psi_{rx} + {}^C\hat{\$}_{ry}\Psi_{ry} + {}^C\hat{\$}_{rz}\Psi_{rz}, \quad (2.21)$$

onde  $\hat{\$}_{px}$  representa o movimento na junta  $px$ ,  $\hat{\$}_{py}$  representa o movimento na junta  $py$ ,  $\hat{\$}_{pz}$  representa o movimento na junta  $pz$ ,  $\hat{\$}_{rx}$  representa o movimento na junta  $rx$ ,  $\hat{\$}_{ry}$  representa o movimento na junta  $ry$ ,  $\hat{\$}_{rz}$  representa o movimento na junta  $rz$ .

A Eq. (2.21) pode ser reescrita de forma mais compacta,

$${}^C\$_V = \sum_{i=1}^6 {}^C\hat{\$}_{vi}\Psi_{vi}, \quad (2.22)$$

onde:  ${}^C\hat{\$}_{v1} = {}^C\hat{\$}_{px}$ ,  ${}^C\hat{\$}_{v2} = {}^C\hat{\$}_{py}$ ,  ${}^C\hat{\$}_{v3} = {}^C\hat{\$}_{pz}$ ,  ${}^C\hat{\$}_{v4} = {}^C\hat{\$}_{rx}$ ,  ${}^C\hat{\$}_{v5} = {}^C\hat{\$}_{ry}$ ,  ${}^C\hat{\$}_{v6} = {}^C\hat{\$}_{rz}$ .

A escolha do sistema  $C$  como referencial simplifica a representação dos helicóides das juntas que compõem a cadeia cinemática. Entretanto, no caso do veículo submarino, a origem do sistema de referência do corpo é usualmente posicionada no centro de gravidade e seus eixos coordenados coincidem com os eixos principais de inércia [Fossen, 1998]. Neste trabalho este sistema é denominado sistema do veículo (sistema  $V$ ).

Assim, a representação do movimento do veículo no sistema  $V$  é obtida empregando a transformação de coordenadas de helicóides definida na Eq. (2.15)

$${}^V\mathcal{S}_V = {}^V T_C \sum_{i=1}^6 {}^C\hat{\mathcal{S}}_{vi} \Psi_{vi}. \quad (2.23)$$

A transformação  ${}^V T_C$  é obtida considerando que as origens dos sistemas  $C$  e  $V$  coincidem na origem, logo, não existe translação entre estes sistemas, ou seja  $\mathcal{S}(\cdot) = 0$ . Da Eq.2.15 tem-se que

$${}^V T_C = \begin{bmatrix} {}^V R_{C(3 \times 3)} & [0]_{(3 \times 3)} \\ [0]_{(3 \times 3)} & {}^V R_{C(3 \times 3)} \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Assim, a transformação de coordenadas do sistema  $C$  para o sistema  $V$  consiste apenas em uma rotação  ${}^V R_C$ . Cabe observar que devido à escolha do sistema  $C$  esse é paralelo ao sistema inercial  $I$ . Portanto, a orientação do veículo em relação ao sistema  $C$  ( ${}^C R_V$ ) é igual à orientação do veículo em relação ao sistema inercial, ou seja,  ${}^C R_V = {}^I R_V$  (ver Fig. 2.6).

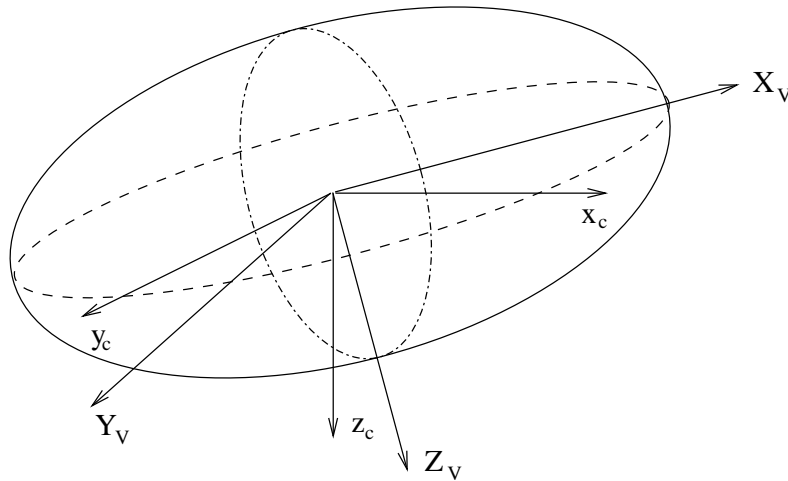


Figura 2.6: Orientação do veículo em relação ao sistema-C

Por isso a matriz de rotação  ${}^V R_C$ , necessária na transformação de coordenadas (2.23), pode ser calculada a partir da orientação do veículo em relação ao sistema inercial dada pelos os ângulos *roll* ( $\phi$ ), *pitch* ( $\theta$ ) e *yaw* ( $\psi$ ), que também são denominados pelo acrônimo de ângulos *RPY*.

Esta é uma representação mínima, obtida através da composição de rotações elementares em relação a um sistema de referência fixo, e é freqüentemente utilizada nos campos das Engenharias Naval e Aeronáutica.

A matriz de rotação entre o sistema do veículo e o sistema inercial é obtida pela composição das matrizes correspondentes aos ângulos *RPY*.

O ângulo *roll* é em torno do eixo *x* e a matriz de rotação é

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & s_\phi & c_\phi \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$

O ângulo *pitch* é em torno do eixo *y* e a matriz de rotação é

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix}. \quad (2.26)$$

O ângulo *yaw* é em torno do eixo *z* e a matriz de rotação é

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

O sistema de orientação resultante é obtido pela composição das rotações em relação ao sistema fixo (sistema inercial-*I*), e assim pode ser obtido pela premultiplicação das matrizes das rotações elementares [Sciavicco and Siciliano, 1996]:

$${}^I R_V = R_z(\phi) R_y(\theta) R_x(\psi). \quad (2.28)$$

Assim,

$${}^I R_V \equiv {}^C R_V = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & -s_\psi c_\phi + c_\psi s_\theta s_\phi & s_\psi s_\phi + c_\psi c_\phi s_\theta \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\phi + s_\phi s_\theta s_\psi & -c_\psi s_\phi + s_\theta s_\psi c_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix}, \quad (2.29)$$

e a matriz  ${}^V R_C$  resulta

$${}^V R_C = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & s_\psi c_\theta & -s_\theta \\ -s_\psi c_\phi + c_\psi s_\theta s_\phi & c_\psi c_\phi + s_\phi s_\theta s_\psi & c_\theta s_\phi \\ s_\psi s_\phi + c_\psi c_\phi s_\theta & -c_\psi s_\phi + s_\theta s_\psi c_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

Com a utilização da Eq. (2.30) na Eq. (2.24) obtém-se a transformação  ${}^V T_C$  que permite a representação do movimento do veículo no sistema  $V$ .

Esta seção descreveu a modelagem cinemática de veículos submarinos através de uma analogia com uma cadeia cinemática para representar os movimentos do mesmo. A vantagem desta representação torna-se mais evidente quando um manipulador é integrado ao veículo submarino.

Com o objetivo de efetuar a integração entre um veículo submarino e um manipulador serial, a próxima seção apresenta a representação da cinemática diferencial de um manipulador serial através da teoria de helicóides.

### 2.1.4 Movimento de um manipulador serial

Um robô é um sistema de elos conectados por juntas. Este sistema representa uma cadeia cinemática aberta.

Neste caso o último elo da cadeia é o efetuador ( $E$ ) e o seu movimento em relação à base pode ser descrito por um heligiro  $\$E$  dado por

$$\$E = \sum_{i=1}^n \hat{\$}_{mi} \Psi_{mi}, \quad (2.31)$$

onde  $\hat{\$}_{mi}$ ,  $i = 1, \dots, n$  são os heligiros normalizados correspondentes aos pares cinemáticos das juntas do manipulador, e  $\Psi_{mi}$ ,  $i = 1, \dots, n$  são as suas respectivas magnitudes.



Neste trabalho, apresenta-se como exemplo a modelagem de um manipulador PUMA [Campos, 2004], pelo fato de que este é um robô ainda amplamente utilizado em centros de pesquisa (Fig.2.7).

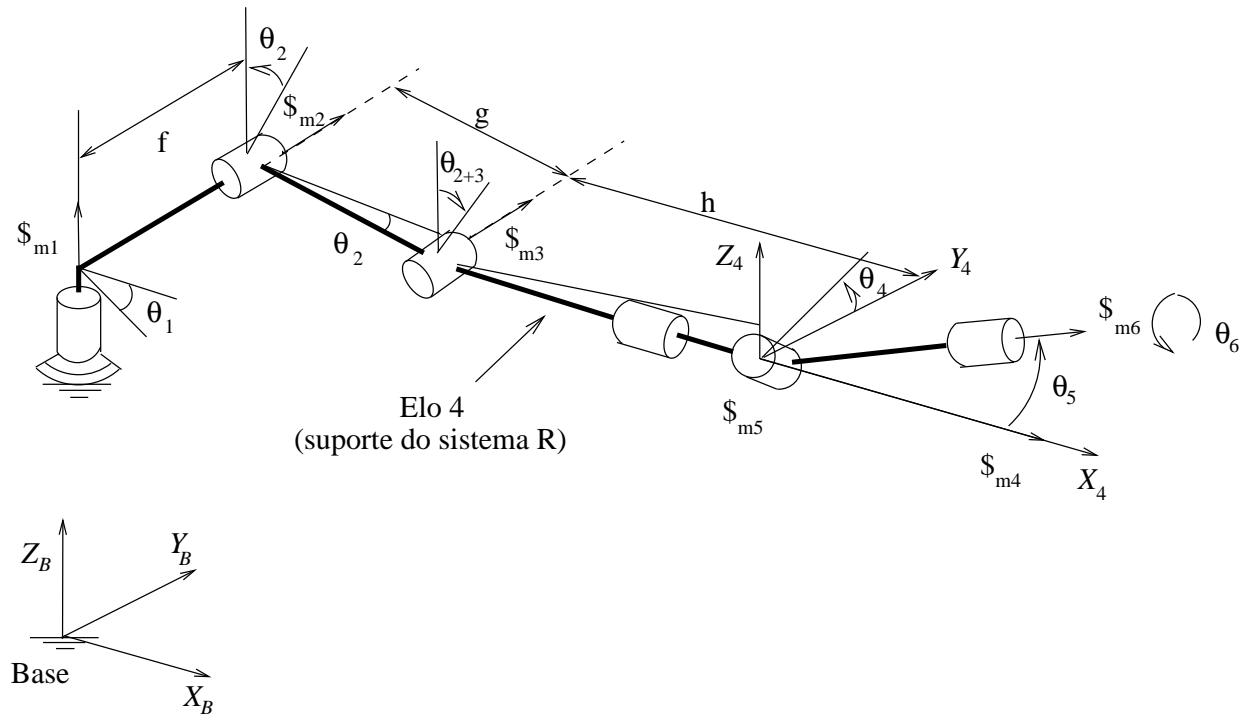


Figura 2.7: Cadeia cinemática do robô manipulador serial PUMA.

O PUMA é um manipulador serial espacial com seis graus de liberdade. Todas as suas juntas são rotativas. Suas três últimas juntas formam um punho esférico e se intersectam em um ponto denominado centro do punho esférico.

Os ângulos de posição  $\theta_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ , e  $6$ ) das juntas rotativas do PUMA são expostos na Fig. 2.7. Os heligiros  $\hat{\$}_{mi}$  que representam os movimentos das juntas são alinhados ao eixo de rotação das juntas e simbolizados por meio de setas.

Considerando a arquitetura do manipulador PUMA e visando a simplicidade nos termos dos helicóides normalizados que representam as suas juntas, vários autores [Tsai, 1999, Hunt, 1987, Martins, 2001] usam um sistema de coordenadas fixo ao elo 4, denominado sistema- $R$ , no centro do punho esférico para representar estes helicóides, ver Fig. 2.7.

Neste caso os heligiros normalizados correspondentes aos pares cinemáticos das juntas do manipulador são

$${}^{R}\hat{\$}_{m1} = \begin{bmatrix} -s_{23} \\ 0 \\ c_{23} \\ -f c_{23} \\ x_{14} \\ -f s_{23} \end{bmatrix}; {}^{R}\hat{\$}_{m2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ g s_3 \\ 0 \\ x'_{41} \end{bmatrix}; {}^{R}\hat{\$}_{m3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -h \end{bmatrix}; {}^{R}\hat{\$}_{m4} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; {}^{R}\hat{\$}_{m5} = \begin{bmatrix} 0 \\ -s_4 \\ c_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; {}^{R}\hat{\$}_{m6} = \begin{bmatrix} c_5 \\ c_4 s_5 \\ s_4 s_5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

onde,  $s_i = \sin(\theta_i)$ ,  $s_{ik} = \sin(\theta_i + \theta_k)$ ,  $c_i = \cos(\theta_i)$ ,  $c_{ik} = \cos(\theta_i + \theta_k)$ ,  $x_{14} = g c_2 + h c_{23}$ ,  $x'_{41} = -(g c_3 + h)$ , sendo as letras  $f$ ,  $g$  e  $h$  as distâncias mostradas na Fig. 2.7.

Assim, o movimento do efetuador em relação à base representado no sistema  $R$  é dado por

$${}^R\$_E = \sum_{i=1}^6 {}^{R}\hat{\$}_{mi} \Psi_{mi}, \quad (2.33)$$

onde os heligiros  ${}^{R}\hat{\$}_{mi}$  são dados em (2.32).

O movimento do efetuador em relação à base representado no sistema B (da base) é obtido por

$${}^B\$_E = {}^B T_R {}^R\$_E \quad (2.34)$$

sendo,

$${}^B T_R = {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4, \quad (2.35)$$

onde  ${}^1 T_2$ ,  ${}^2 T_3$  e  ${}^3 T_4$  são transformações de coordenadas entre sistemas fixos nos elos 1, 2 e 3, respectivamente.

Essas transformações podem ser obtidas definindo uma posição de referência como mostrado na Fig.2.8, escolhendo um sistema de coordenadas fixo em cada elo e calculando as matrizes de rotação e os vetores de posição entre as origens de sistemas adjacentes.

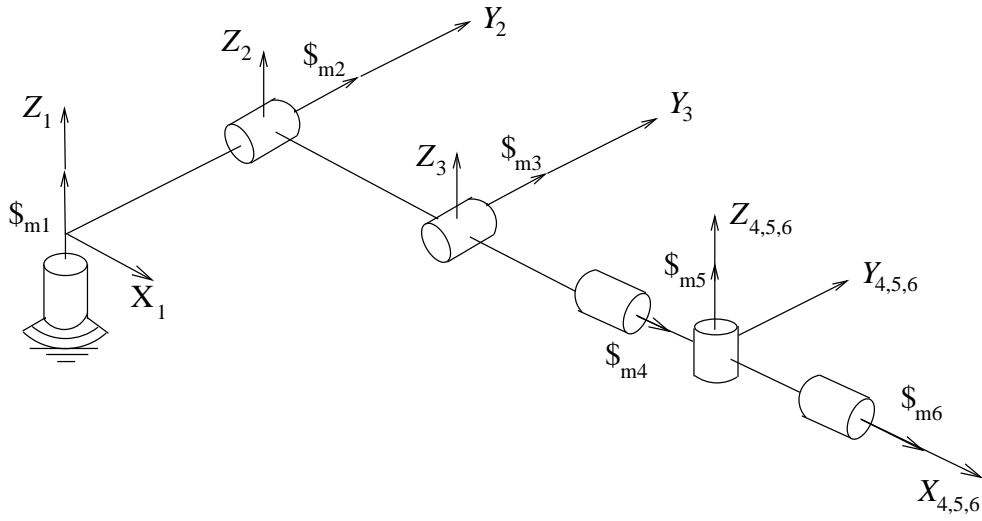


Figura 2.8: Posição de referência do robô PUMA.

Considerando os sistemas de coordenadas da Fig.2.8, as matrizes de rotação  ${}^{i-1}R_i$  são

$${}^1R_2 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^2R_3 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & 0 & s\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_2 & 0 & c\theta_2 \end{bmatrix}, \quad {}^3R_4 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & s\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_3 & 0 & c\theta_3 \end{bmatrix} \cdot (2.36)$$

Enquanto os vetores entre as origens dos sistemas adjacentes  ${}^{i-1}p_i$  são

$${}^1p_2 = \begin{bmatrix} -fs\theta_1 \\ fc\theta_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^2p_3 = \begin{bmatrix} gc\theta_2 \\ 0 \\ -gs\theta_2 \end{bmatrix}, \quad {}^3p_4 = \begin{bmatrix} hc\theta_3 \\ 0 \\ -hs\theta_3 \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

Com as Eq's. (2.36) e (2.37) obtém-se as transformações  ${}^1T_2$ ,  ${}^2T_3$  e  ${}^3T_4$  com a Eq. 2.34 a transformação  ${}^BT_R$  que permite a representação do movimento do manipulador no sistema da base.

## 2.2 Modelagem cinemática de um *SVM*

O *SVM* é composto pelo manipulador acoplado ao veículo que é a base do manipulador. O movimento do efetuador é obtido em relação ao veículo representado no sistema da base do manipulador. Para obter o movimento do efetuador em relação a um sistema inercial deve-se acrescentar o movimento do veículo em relação ao sistema inercial descrito, por exemplo, pela expressão (2.23).

Cabe observar que o movimento do veículo está representado no sistema do veículo (sistema  $V$ ) enquanto o movimento do manipulador está representado no sistema  $B$ . Para representar ambos os movimentos no sistema do veículo é preciso representar o movimento do manipulador no sistema do veículo.

Assim, o movimento do efetuador em relação ao sistema inercial, representado no sistema do veículo resulta

$${}^V\$_E = {}^V\$_V + {}^VT_B {}^B\$_E, \quad (2.38)$$

sendo

$${}^VT_B = \begin{bmatrix} [I]_{(3 \times 3)} & [0]_{(3 \times 3)} \\ [\mathcal{S}({}^c\vec{d}_b)]_{(3 \times 3)} & [I]_{(3 \times 3)} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

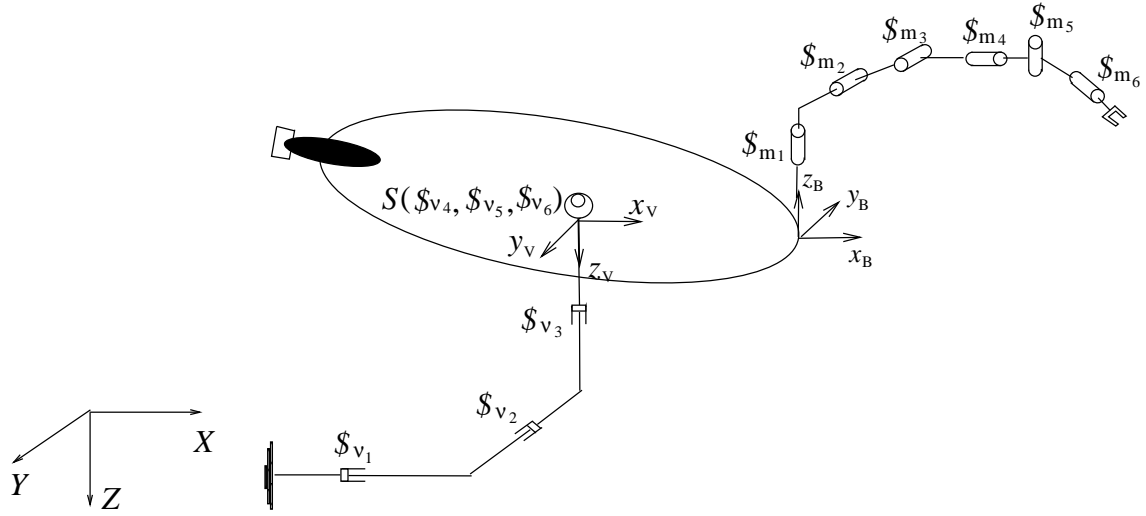
onde  ${}^c\vec{d}_b = [dx, dy, dz]^T$  é o vetor posição da base (onde o manipulador está acoplado ao veículo) em relação ao centro de gravidade do veículo e

$$\mathcal{S}({}^c\vec{d}_b) = \begin{bmatrix} 0 & -d_z & d_y \\ d_z & 0 & -d_x \\ -d_y & d_x & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

Substituindo a Eq.(2.34) resulta

$${}^V\$_E = {}^V\$_V + {}^VT_B {}^BT_R {}^R\$_E, \quad (2.41)$$

onde  ${}^BT_R {}^R\$_E$  representa a contribuição do movimento do manipulador.

Figura 2.9: Estrutura cinemática do *SVM* espacial

A Eq.(2.41) pode ser escrita na forma

$${}^V\hat{\$}_E = \sum_{n=1}^6 {}^V\hat{\$}_{\nu_i} \Psi_{\nu_i} + \sum_{n=1}^6 {}^V\hat{\$}_{m_i} \Psi_{m_i}, \quad (2.42)$$

onde  ${}^V\hat{\$}_{\nu_i} = {}^V T_C {}^C\hat{\$}_{\nu_i}$ , e  ${}^V\hat{\$}_{m_i} = {}^V T_B {}^B T_R {}^R\hat{\$}_{m_i}$ ,  $i = 1, \dots, 6$ .

Em formato matricial tem-se que

$$\hat{\$}_E = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{\nu 1} & \hat{\$}_{\nu 2} & \dots & \hat{\$}_{\nu 6} & \hat{\$}_{m 1} & \hat{\$}_{m 2} & \dots & \hat{\$}_{m 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{\nu 1} \\ \Psi_{\nu 2} \\ \vdots \\ \Psi_{\nu 6} \\ \Psi_{m 1} \\ \Psi_{m 2} \\ \vdots \\ \Psi_{m 6} \end{bmatrix}. \quad (2.43)$$

onde o superíndice  $V$  foi omitido porque pela expressão (2.42), fica claro que todos os helgiros normalizados estão representados no sistema do veículo.

A Eq.(2.44) pode ser reescrita da seguinte forma compacta

$$\dot{\$}_E = [J] \dot{\Psi} \quad (2.44)$$

onde  $J$  é denominada de *matriz Jacobiana helicóide* e  $\Psi$  é o vetor coluna das magnitudes dos respectivos heligiros.

A Eq. (2.44) expressa claramente a redundância do veículo, pois o número de colunas da matriz Jacobiana supera o de linhas, ou seja, o número de graus de liberdade do sistema robótico 12 *dof* (*degree of freedom*) composto pelo veículo 6 *dof* e manipulador 6 *dof* excede a dimensão do espaço de trabalho 6 *dof*.

## 2.3 Conclusões

Foi desenvolvida a modelagem sistemática da cinemática de SVMS's utilizando a teoria de helicóides. Esta modelagem considerou a representação do movimento do veículo como uma cadeia cinemática serial composta por juntas prismáticas que promovem os deslocamentos lineares e por juntas rotativas que promovem os deslocamentos angulares ou orientações do veículo. Foi apresentado um exemplo de modelagem cinemática de um manipulador serial e finalmente o modelo completo de um SVMS. Esta modelagem tornou evidente a redundância intrínseca dos SVMS. O próximo capítulo apresenta alguns métodos convencionais de resolução de redundância.

## Capítulo 3

# Métodos Utilizados para a Solução da Redundância

*Neste capítulo apresenta-se uma revisão de algumas técnicas para solução da redundância de sistemas robóticos. Neste sentido, devido aos graus de liberdade adicionais fornecidos pelo submarino, os sistemas veículo-manipulador submarinos (SVMS) classificam-se como sistemas redundantes.*

### 3.1 Introdução ao controle cinemático

Uma tarefa de manipulação é frequentemente dada em termos de posição e orientação da trajetória do efetuador. No caso do SVMS, o objetivo do controle cinemático é encontrar trajetórias para o veículo e para o manipulador  $\eta(t)$ ,  $q(t)$  que correspondam à trajetória desejada para o efetuador. A saída do algoritmo da cinemática inversa  $\eta_r(t)$ ,  $q_r(t)$  fornece os valores de referência para a lei de controle do SVMS. Esta lei de controle calcula as forças de acionamento de forma que a trajetória de referência seja seguida enquanto neutraliza os efeitos dinâmicos, distúrbios externos e erros de modelagem [Fossen, 1998], [Schjølberg and Fossen, 1995].

De acordo com o apêndice B, o mapeamento diferencial entre as velocidades do efetuador  $\dot{x}_E$  e as velocidades do veículo e juntas do manipulador  $\zeta$  é fornecido por:

$$\dot{x}_E = J_E(\eta, q)\zeta, \quad (3.1)$$

onde  $J_E(\eta, q)$  é uma matriz retangular pois apresenta um número de colunas maior que o número de linhas, o que caracteriza a redundância do *SVMS*. Uma redundância cinemática ocorre quando um sistema robótico possui mais graus de liberdade que os necessários para desempenhar uma dada tarefa. Neste sentido, um *SVMS* é sempre cinematicamente redundante devido aos graus de liberdade providos pelo veículo.

Neste contexto, robôs redundantes possuem algumas vantagens quando comparados aos robôs não-redundantes pois eles permitem a otimização de sua trajetória nas situações onde o espaço da tarefa é livre ou não da presença de obstáculos, e na resolução de singularidades.

Entretanto, o problema da cinemática inversa para estes robôs admite um número infinito de soluções e desta forma, tornam-se necessários critérios para sua resolução. Neste trabalho, o problema para resolução de robôs redundantes será tratado no nível cinemático diferencial.

### 3.2 Controle cinemático aplicado aos *SVMS*

É usual a aplicação de sistemas robóticos submarinos para participar de missões tais como reparos em tubulações, manutenção de cabos, monitoração de estruturas *off-shore*, além de coleta de sistemas biológicos. O estado da arte destas missões que envolvem manipulações submarinas está principalmente associado ao uso de manipuladores montados sobre veículos operados remotamente (ROVs). Com o objetivo de que os *SVMS* realizem missões autônomas como AUVs, é desejável que os controles cinemáticos desenvolvidos explorem as suas redundâncias.

Entretanto, cabe destacar que os *SVMSs* caracterizam-se pela coordenação de movimento entre o veículo e o manipulador, pois durante a execução de certas tarefas que necessitam de grandes deslocamentos (ex: inspeção de tubulações), o veículo é usado para movimentos lentos e extensos. Enquanto isso, o manipulador desenvolve movimentos rápidos e precisos, ou seja, torna-se necessária a coordenação entre a precisão do efetuador e simultaneamente a garantia dos objetivos adicionais de controle. Entre estes objetivos, pode-se destacar o compromisso de



manter grande destreza do braço manipulador durante a trajetória do efetuador e a redução do movimento do veículo [Antonelli and Chiaverini, 1998, Yoshio and Xiaoping, 1994a, Yoshio and Xiaoping, 1994b]. Como exemplo, destaca-se a seguir a abordagem da Prioridade da Tarefa (ver [Antonelli, 2003] para mais detalhes). Nesta abordagem, a partir do vetor de velocidades de referência  $\zeta_r$ , obtém-se a posição, a orientação do veículo  $\eta_r$  e a configuração do manipulador  $q_r$ :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \eta_r(t) \\ q_r(t) \end{bmatrix} &= \int_0^t \begin{bmatrix} \dot{\eta}_r(\sigma) \\ \dot{q}_r(\sigma) \end{bmatrix} d\sigma + \begin{bmatrix} \eta(0) \\ q(0) \end{bmatrix} \\ &= \int_0^t J_k^{-1}(\sigma) \zeta_r(\sigma) d\sigma + \begin{bmatrix} \eta(0) \\ q(0) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Em controle cinemático, a saída do algoritmo da cinemática inversa (CI) fornece os valores de referência para a lei de controle dinâmico do sistema veículo-manipulador.

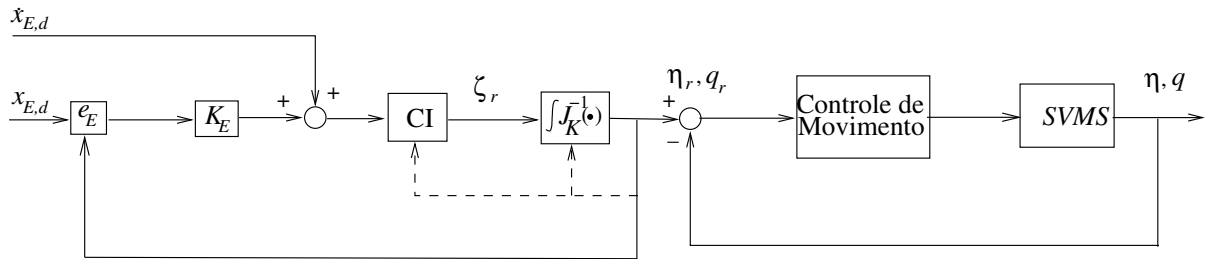


Figura 3.1: Laços cinemático e dinâmico

Estas leis de controle dinâmico são encarregadas de computar as forças de acionamento, ou seja os comandos para os propulsores do veículo e atuadores dos manipuladores. O algoritmo de controle cinemático é independente da lei de controle dinâmico. Esta última é baseada no espaço do veículo-manipulador, ou seja, requer como entrada a referência de posição e de velocidade das juntas. A Fig. 3.1 expõe o diagrama de blocos que representa o algoritmo da cinemática inversa de malha fechada da Prioridade da Tarefa. Nota-se que o diagrama é composto por dois laços: o laço da cinemática inversa e o laço dinâmico que recebe, como entradas de referência,

as trajetórias de referência das juntas, as quais são saídas do algoritmo da cinemática inversa. O termo  $e_E$  representa o erro de reconstrução numérica, enquanto  $K_E$  representa a matriz de ganhos, os quais são escolhidos para garantir a convergência para zero dos referidos erros.

### 3.3 Algumas técnicas para solução da redundância de robôs

Nesta seção apresenta-se algumas técnicas mais utilizadas para a solução de redundância de sistemas robóticos.

#### 3.3.1 Pseudoinversa

A maioria das pesquisas em controle de manipuladores redundantes desenvolvem a solução cinemática diferencial por meio da pseudo-inversa  $J^\dagger$  da matriz jacobiana  $J$

$$J^\dagger = J^T (J J^T)^{-1}. \quad (3.3)$$

Todavia, identifica-se nesta solução algumas inconveniências. Uma destas inconveniências reside em não existir garantia de que as singularidades cinemáticas serão evitadas [Antonelli and Chiaverini, 1998, Chiaverini et al., 1991, Chiaverini et al., 1997].

Os métodos baseados na pseudo-inversa da matriz jacobiana apresentam problemas enquanto que não é garantido o movimento conservativo [Duarte, 2002], [Klein and Hunag, 1983], ou seja movimentos repetitivos do efetuador não resultam necessariamente em movimentos repetitivos nas juntas.

Outro problema diz respeito especificamente a sua aplicação aos *SVMS*, pois dada a velocidade do efetuador final, isto pode resultar no movimento de ambos veículo e manipulador, o que não é desejável sob o ponto de vista de consumo energético e, por consequência, os graus de liberdade disponíveis do sistema não são totalmente explorados [Antonelli, 2003, Antonelli and Chiaverini, 1998, Antonelli and Chiaverini, 2003].

Finalmente, observa-se que o uso da pseudoinversa introduz um problema dimensional associado aos tipos de juntas que constituem o sistema. Este problema restringe o método a manipu-

ladores somente com juntas rotativas ou somente com juntas prismáticas [Downing, 2002, Hunt, 2000].

Por exemplo, para um manipulador redundante de 7 graus de liberdade, a definição da pseudo-inversa requer o seguinte produto de jacobianos

$$JJ^T = \begin{bmatrix} L_1 \cdots & \cdots & \cdots L_7 \\ M_1 \cdots [\text{comprimento}^0] \cdots M_7 \\ N_1 \cdots & \cdots & \cdots N_7 \\ P_1 \cdots & \cdots & \cdots P_7 \\ Q_1 \cdots [\text{comprimento}^1] \cdots Q_7 \\ R_1 \cdots & \cdots & \cdots R_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 & M_1 & N_1 & P_1 & Q_1 & R_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots [\text{comprimento}^0] & \vdots & \vdots [\text{comprimento}^1] & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_7 & M_7 & N_7 & P_7 & Q_7 & R_7 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

onde as colunas de  $J$  são os heligros normalizados de cada junta e  $[ \ ]$  indica o tipo de unidades de cada submatriz.

Os heligros normalizados, colunas de  $J$ , contêm termos adimensionais ( $L, M, N$ ) e termos com unidades de comprimento ( $P, Q, R$ ). Assim, dentro da matriz  $J$  e da matriz  $J^T$  existem duas submatrizes, uma cujos termos são adimensionais  $[\text{comprimento}^0]$  e outra cujos termos tem unidades de comprimento  $[\text{comprimento}^1]$ . Conseqüentemente, as unidades dos termos da matriz resultante  $JJ^T$  são

$$\begin{bmatrix} [\text{comprimento}^0] & [\text{comprimento}^1] \\ [\text{comprimento}^1] & [\text{comprimento}^2] \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Cada elemento pertencente à submatriz  $(3 \times 3)$  superior esquerda é a soma dos produtos de duas coordenadas dentre os  $L$ 's,  $M$ 's e  $N$ 's, e cada elemento da submatriz  $(3 \times 3)$  inferior direita é a soma dos produtos de duas coordenadas dentre os  $P$ 's,  $Q$ 's e  $R$ 's. Os elementos das outras duas submatrizes são somatórios de produtos entre uma variável dentre os  $L$ 's,  $M$ 's ou  $N$ 's e outra variável dentre os  $P$ 's,  $Q$ 's ou  $R$ 's.

O produto da Eq. (3.4) somente é significativo quando todos os  $P$ 's,  $Q$ 's e  $R$ 's ou todos os  $L$ 's,  $M$ 's e  $N$ 's são nulos, quando todas as juntas do manipuladores ou são somente rotativas ou

somente prismáticas, respectivamente.

Na seqüência, a título de exemplo [Hunt, 2000], é mostrada a inconsistência dimensional de  $JJ^T$  em um manipulador redundante com três juntas rotativas e uma junta prismática.

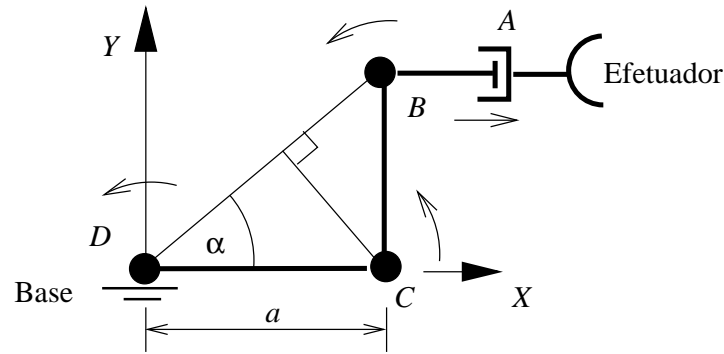


Figura 3.2: Manipulador redundante  $RRRP$

Considere o manipulador serial  $RRRP$  mostrado na Fig. 3.2, onde os heligiros normalizados da junta prismática  $A$  e das juntas rotativas  $B$ ,  $C$  e  $D$  no instante mostrado são

$$\hat{\$}_A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \hat{\$}_B = \begin{bmatrix} 1 \\ a \tan \alpha \\ -a \end{bmatrix}; \hat{\$}_C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -a \end{bmatrix}; \hat{\$}_D = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (3.6)$$

Portanto, o seu jacobiano é definido como

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & a \tan \alpha & 0 & 0 \\ 1 & -a & -a & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \leftarrow N_i \\ \leftarrow P_i \\ \leftarrow Q_i \end{matrix} \quad (3.7)$$

Para encontrar a pseudo-inversa de  $J$  é preciso calcular  $JJ^T$

$$JJ^T = \left[ \begin{array}{c|cc} 3 & a \tan \alpha & 2a \\ \hline a \tan \alpha & a^2 \tan^2 \alpha & -a^2 \tan \alpha \\ -2a & -a^2 \tan \alpha & 1 + 2a^2 \end{array} \right] \quad (3.8)$$

As unidades das quatro submatrizes estão “quase” de conformidade como a expressão da Eq. (3.5) mas o elemento  $1 + 2a^2$  na posição (3, 3) na matriz  $JJ^T$  apresenta inconsistência dimensional,  $1 + 2a^2 = [\text{comprimento}^0] + [\text{comprimento}^2]$  [Hunt, 2000].

Diversas outras técnicas foram desenvolvidas baseadas na matriz pseudo-inversa e a seguir são apresentadas algumas delas, como *Prioridade da Tarefa*, *Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades* e *Amortecimento por Mínimos Quadrados*.

### 3.3.2 Prioridade da Tarefa (*Task Priority*)

A técnica de resolução de redundância denominada Prioridade da Tarefa ([Antonelli, 2003], [Antonelli and Chiaverini, 1998], [Antonelli and Chiaverini, 2003], [Chiaverini et al., 1991], [Chiaverini et al., 1997], [Nakamura et al., 1987]) coordena os movimentos do manipulador e do veículo através da minimização de uma função de custo quadrática adequada.

Utilizando a minimização da função de custo quadrático ( $\zeta^T \zeta$ ) a solução geral é dada por:

$$\zeta_r = J^\dagger(\eta, q)\dot{x}_{E,d} + (I_N - J^\dagger(\eta, q)J(\eta, q))\zeta_a \quad (3.9)$$

onde  $\zeta_a \in \mathcal{R}^{6+n}$  é um vetor de velocidades veículo/juntas arbitrário e  $N = 6 + n$ . Considera-se que o operador  $(I_N - J^\dagger(\eta, q)J(\eta, q))$  projeta o vetor genérico das velocidades das juntas no espaço nulo de uma matriz Jacobiana. Isto corresponde à geração de movimentos internos no braço manipulador que não afetam o movimento do efetuador.

A Eq. (3.9) representa a projeção da tarefa secundária, descrita por  $\zeta_a$ , no espaço nulo da tarefa primária com prioridade mais alta, isto é, a tarefa do efetuador-final. Para tanto, escolhe-se uma tarefa primária  $x_{p,d} \in \mathbb{R}^m$  e uma matriz Jacobiana correspondente  $J_p(q) \in \mathbb{R}^{m \times (6+n)}$

$$\dot{x}_{p,d} = J_p(q)\zeta \quad (3.10)$$

e para projetar a tarefa secundária  $x_{s,d} \in \mathbb{R}^r$  e uma matriz Jacobiana correspondente  $J_s(q) \in \mathbb{R}^{r \times (6+n)}$ :

$$\dot{x}_{s,d} = J_s(q)\zeta, \quad (3.11)$$

assim, o vetor das velocidades das juntas é dado por

$$\zeta_r = J_p^\dagger \dot{x}_{p,d} + (J_s (I_N - J_p^\dagger J_p))^\dagger (\dot{x}_{s,d} - J_s J_p^\dagger \dot{x}_{p,d}). \quad (3.12)$$

Entretanto, próximo de singularidades algorítmicas, a solução torna-se mal condicionada o que pode resultar em grandes velocidades de juntas. Isto significa que, apesar de  $J_s$  e  $J_p$  serem de posto completo, a matriz  $(J_s (I_N - J_p^\dagger J_p))^\dagger$  perde seu posto. Além disto, o problema da inconsistência dimensional ainda persiste nesta técnica devido ao uso de matrizes pseudoinversas.

### 3.3.3 Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades

Nesta técnica as tarefas primárias e secundárias são invertidas separadamente por pseudoinversas dos seus respectivos Jacobianos para se evitar singularidades algorítmicas (Eq. 3.13). Por outro lado, como citado anteriormente, ainda é utilizado o cálculo de matrizes pseudoinversas o que implica uma conseqüente inconsistência dimensional.

$$\zeta_r = J_p^\dagger(\eta, q)\dot{x}_{p,d} + (I_N - J_p^\dagger(\eta, q)J_p(\eta, q))J_s^\dagger(\eta, q)\dot{x}_{s,d}. \quad (3.13)$$

### 3.3.4 Mínimos Quadrados Amortecidos (*Dumped Least Square*)

A aplicação da técnica dos mínimos quadrados amortecidos a robôs redundantes está fundamentalmente associada ao problema de evitar singularidades. Esta técnica tenta contornar a descontinuidade provocada em pontos singulares na técnica da matriz pseudoinversa [Nenchev, 1989]. Para tanto, se um algoritmo baseado na pseudoinversa é usado, a solução dos mínimos quadrados minimiza o erro residual

$$\| \dot{x} - J\dot{\theta} \|^2. \quad (3.14)$$

Entretanto, em pontos singulares a pseudoinversa implica uma função descontínua. Para contornar esta descontinuidade, a formulação dos mínimos quadrados amortecidos sugerida por [Wampler, 1986] faz uma minimização da seguinte função de custo

$$\| \dot{x} - J\dot{\theta} \|^2 + \alpha \| \dot{\theta} \|^2, \quad (3.15)$$

onde  $\alpha$  é um fator de amortecimento. Assim, a inversa generalizada é definida como

$$J^\# = J^T B^{-1}, \quad B = (J^T J + \alpha^2 I) \quad (3.16)$$

Uma formulação similar foi encontrada por [Nakamura and Hanafusa, 1981]. Estes autores sugerem uma combinação da técnica dos mínimos quadrados com pesos amortecidos e obtiveram a inversa generaliza como

$$J^\# = (J^T W_1 J + W_2)^{-1} J^T W_1 \quad (3.17)$$

onde  $W_1, W_2 > 0$  são matrizes de pesos. Na Eq. (3.17),  $W_2$  incorpora também o fator de amortecimento  $\alpha$ . A inversa generalizada (3.17) foi denominada de *inversa robusta a singularidades*.

Wampler usou um valor fixo para  $\alpha$ , obtido de um limite razoável para a mudança no erro residual. Entretanto, deseja-se obter um grande amortecimento próximo das singularidades, e pequeno ou nulo em regiões não singulares. Neste sentido, Nakamura e Hanafusa propuseram uma técnica de ajuste automático para  $\alpha$ :

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_0(1 - h_1/h_1^s), & \text{se } h_1 < h_1^s \\ 0, & \text{de outra forma} \end{cases} \quad (3.18)$$

sendo

$$h_1(\theta) = \sqrt{|JJ^T|} \quad (3.19)$$

onde (3.19) é a medida de manipulabilidade definida por [Yoshikawa, 1987].

No caso do *SVMS* a Eq.(3.17) tem a seguinte versão,

$$J^\#(\eta, q) = J^T(\eta, q) (J(\eta, q)J^T(\eta, q) + \alpha^2 I_m)^{-1} \quad (3.20)$$

Entretanto, esta técnica ainda utiliza um processo de otimização que induz uma formulação baseada na matriz pseudoinversa e conseqüentemente, ainda persiste a inconsistência dimensional, apesar das questões de singularidades serem evitadas e do critério de coordenação ser considerado.

### 3.3.5 Resolução da redundância através de um sistema não-redundante

#### 3.3.5.1 A técnica da decomposição

A técnica da decomposição [Hootsmans and Dubowsky, 1993, Yoshio and Xiaoping, 1994a, Yoshio and Xiaoping, 1994b] é baseada na idéia de particionar o Jacobiano em duas submatrizes de dimensões  $m \times m$  e  $(n - m) \times m$ , respectivamente. Esta formulação é exposta a seguir;

$$\dot{x} = J_m \dot{\theta}_m + J_{n-m} \dot{\theta}_{n-m}, \quad (3.21)$$

onde  $J_m$  é a submatriz  $m \times m$  e  $\dot{\theta}_m \in R^m$  correspondem às velocidades das juntas, denominadas de primárias;  $J_{n-m}$  é a submatriz e  $\dot{\theta}_{n-m} \in R^{n-m}$  são as correspondentes velocidades das juntas, denominadas de secundárias. Os valores das velocidades das juntas secundárias podem ser determinados através de um procedimento de otimização  $(n - m)$  - dimensional com algum critério de desempenho desejado. Assim, uma solução para as velocidades das juntas primárias pode ser obtida diretamente de:

$$\dot{\theta}_m = J_m^{-1}(\dot{x} - J_{n-m} \dot{\theta}_{n-m}). \quad (3.22)$$

#### 3.3.5.2 A técnica de extensão do espaço da tarefa

O método do Jacobiano estendido consiste em impor uma função de restrição adicional  $h(q) = 0$  ao Jacobiano original. Esta condição adicional é usada como uma tarefa secundária a ser cumprida simultaneamente com a posição do efetuador. Este método fornece formulações para converter critérios de minimização em funções de restrição.

Assim, dadas as funções de restrição  $h(q) = 0$ , é resolvido o conjunto de equações combinadas

$$\begin{aligned} x &= f(q) \\ 0 &= h(q) \end{aligned} \quad (3.23)$$

onde  $f(q)$  representa a função que relaciona as posições nas juntas ( $q$ ) e a posição do efetuador no espaço operacional ( $x$ ).



A Eq. (3.23) pode ser resolvida numericamente em qualquer ponto ou, quando  $h$  e  $f$  são diferenciáveis, uma condição inicial para a Eq. (3.23) pode ser propagada ao longo de uma trajetória resolvendo a equação da cinemática diferencial

$$J_e \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

onde  $J_e$  é denominada a matriz Jacobiana estendida definida como

$$J_e = \begin{bmatrix} J(q) \\ \partial h(q)/\partial q \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

A condição para a existência de uma única solução  $\dot{q}$  na Eq. (3.24) é que  $J_e$  seja não singular ao longo da trajetória.

Um dos inconvenientes deste método é a presença de singularidades algorítmicas. A partir das Eqs. (3.24) e (3.25), observa-se que o  $\det[J_e] = 0$  pode ter soluções relacionadas somente com a linha adicionada  $\partial h(q)/\partial q$  mas não com a cinemática do manipulador propriamente dita. Neste sentido, as vantagens dos manipuladores redundantes podem ser limitadas por falsas singularidades, possivelmente geradas por uma seleção inconveniente da função de restrição  $h(q)$ .

A seleção de um critério objetivo para  $h(q)$  é uma tarefa complexa [Klein and Hwang, 1983]. A literatura fornece critérios gerais que tendem a ser mais apropriados para determinados problemas. Um dos critérios mais utilizados é

$$h(q) = \sum_{i=1}^n q_i^2 \quad (3.26)$$

onde  $n$  é o número de juntas.

Este critério tende a manter as juntas próximas da sua posição inicial, normalmente no centro do percurso da junta, e afastadas dos seus limites mecânicos. Assim, a última linha da Eq. (3.25), utilizando este critério, torna-se  $2[q_1 \ q_2 \ \cdots \ q_n] = 2q$ .

A equação correspondente à última linha da Eq. (3.25) é

$$\partial h(q)/\partial q = 0. \quad (3.27)$$

Dividindo a Eq. (3.27) por 2 e anexando ao Jacobiano original é gerado o Jacobiano estendido

$$J_e = \begin{bmatrix} J_{6 \times n}(q) \\ q_1 \ q_2 \ \cdots \ q_n \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

A presença das variáveis de todas as juntas na última linha de  $J_e$  é uma forma engenhosa de evitar escolher quais variáveis são importantes para o desempenho do manipulador e quais não, porém esta última linha não esparsa (cheia) aumenta a possibilidade de singularidades algorítmicas no método [Martins, 2001].

Cabe observar, que no critério apresentado na Eq. (3.26) existe inconsistência dimensional se o manipulador possui juntas prismáticas e rotativas. Considere que a primeira junta do manipulador, cuja cinemática está representada na Eq. (3.28), é prismática e que as outras  $(n - 1)$  juntas são rotativas. Assim, a equação que representa a linha adicionada ao jacobiano ou seja, a última equação da Eq. (3.24) é

$$q_1 \dot{q}_1 + q_2 \dot{q}_2 + \cdots + q_n \dot{q}_n = 0 \quad (3.29)$$

Observa-se que as unidades dos termos da Eq. (3.29) não são consistentes, pois o primeiro termo referente a junta prismática tem unidades de  $[\text{comprimento}^1][\frac{\text{comprimento}^1}{\text{tempo}^1}] = [\frac{\text{comprimento}^2}{\text{tempo}^1}]$  enquanto que os outros termos, referentes às juntas rotativas, possuem unidades de  $[\frac{1}{\text{tempo}^1}]$ .

O método do Jacobiano estendido como proposto originalmente, similarmente à solução da pseudo-inversa, pode ser considerado como um caso particular de outras formulações. Por exemplo, pode ser demonstrado que o Jacobiano estendido é um caso particular do método de restrição dos mínimos quadrados [Nenchev, 1989]. Ambos métodos estão entrelaçados, por exemplo o problema das singularidades algorítmicas que caracteriza o método do Jacobiano estendido é encontrado também nas soluções baseadas na pseudo-inversa, tal como a solução por prioridade de tarefa (*task priority*) [Chiaverini et al., 1997].

### 3.4 Conclusões

Neste capítulo revisou-se algumas técnicas convencionais para resolução de redundância de robôs. Na técnica da Pseudoinversa, identificam-se três tipos de inconveniências. A primeira está associada especificamente a sua aplicação aos *SVMS*, pois dada a velocidade do efetuador final, isto pode resultar no movimento de ambos veículo e manipulador, o que não é desejável sob o ponto de vista de consumo energético e por consequência, os graus de liberdade disponíveis do sistema não são totalmente explorados. A segunda inconveniência reside em não existir garantia de que as singularidades cinemáticas serão evitadas. Finalmente, a terceira identifica que o uso da pseudoinversa introduz problemas dimensionais associados aos tipos de juntas que constituem o sistema devido à utilização de um processo de otimização quadrática para obtenção da matriz pseudoinversa.

Outras técnicas baseadas na Pseudoinversa, tais como Mínimos Quadrados Amortecidos, Prioridade da Tarefa e Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades procuram contornar os problemas de coordenação de movimento e de singularidades, embora o problema dimensional permaneça. Outro problema relacionado às técnicas baseadas na Pseudoinversa consiste na questão da repetibilidade, pois um movimento repetitivo no espaço da tarefa não garante repetibilidade no espaço da juntas.

Na técnica do Jacobiano Aumentado, o principal problema consiste na possibilidade de crescimento de singularidades algorítmicas quando estas tarefas adicionais entrarem em conflito com a tarefa do efetuador final.

No próximo capítulo apresenta-se o método das restrições cinemáticas para a solução da redundância do modelo cinemático do *SVMS*.

## Capítulo 4

# O Método das Restrições Cinemáticas

*Neste capítulo é realizada uma formulação a partir de cadeias cinemáticas virtuais aplicadas nas cinemáticas direta e inversa do SVM S. Nesta última, apresenta-se o método das restrições cinemáticas como solução da redundância do SVM S.*

### 4.1 Cinemática Direta do SVM S

De acordo com o método de Davies [Davies, 1981], apresentado no Apêndice A, a descrição do movimento do efetuador-final num sistema Cartesiano pode ser obtida fechando a cadeia do SVM S através da introdução da cadeia virtual PPPS entre a base inercial (solo) e o efetuador final como na Fig. 4.1. O digrafo de acoplamento da Fig. 4.2 representa os elos por nós e as juntas por arestas. Neste último, uma destas arestas representa a junta esférica S, a qual é posteriormente decomposta em juntas rotativas. Esta decomposição é exposta com mais detalhes a seguir no digrafo de movimento da Fig.4.3.

A partir do digrafo de movimento  $G_M$ , forma-se a matriz de heligiros diretos da cadeia cinemática modificada.

$$D = \begin{bmatrix} \hat{\$}_V & \hat{\$}_M & \hat{\$}_E \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

onde

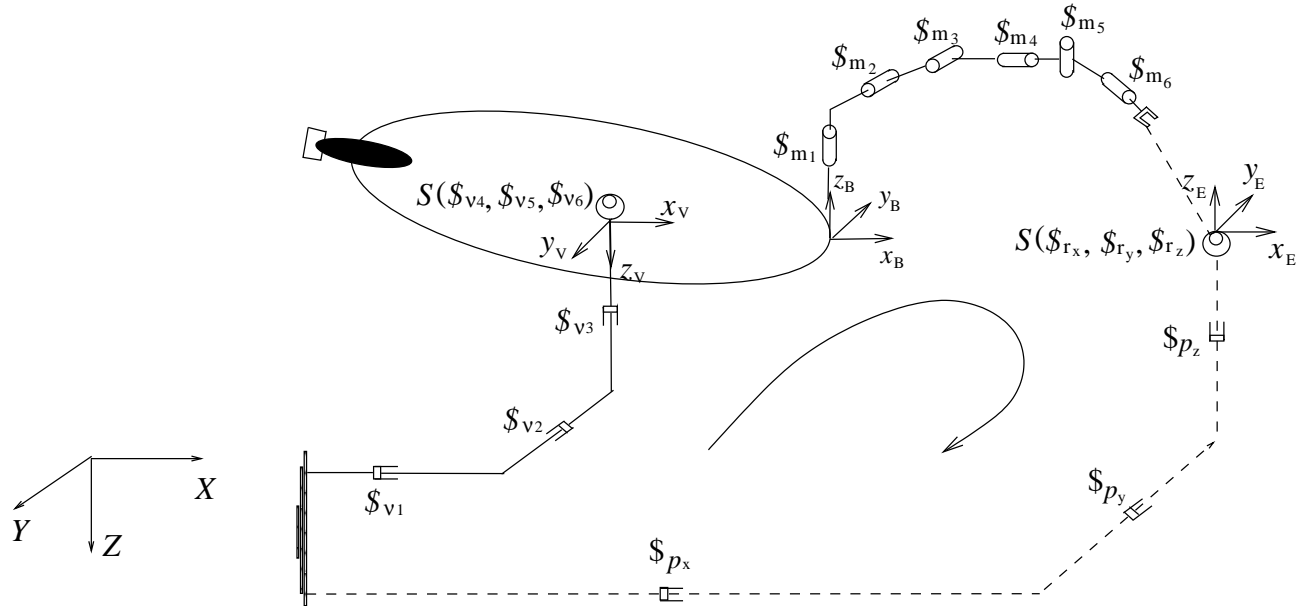
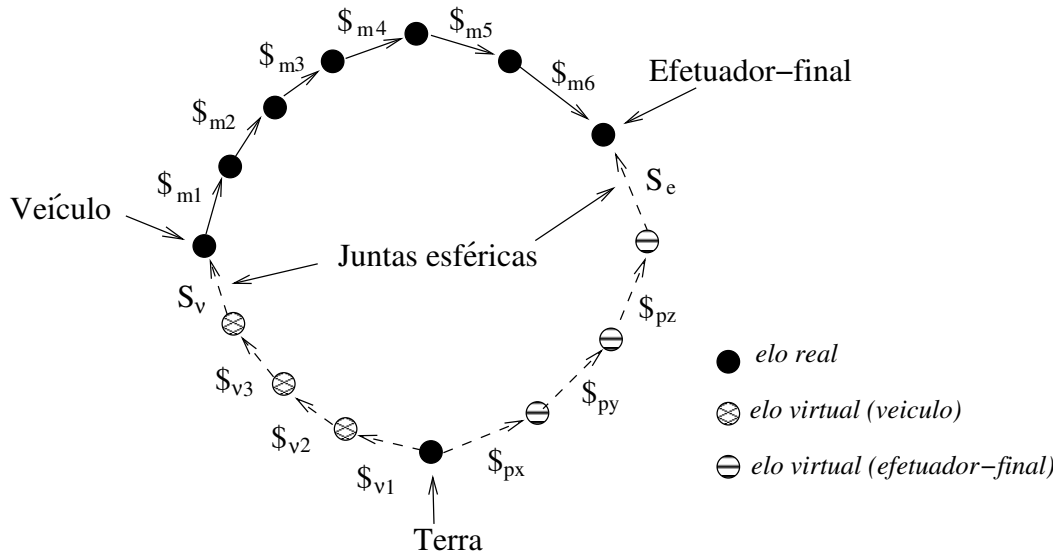
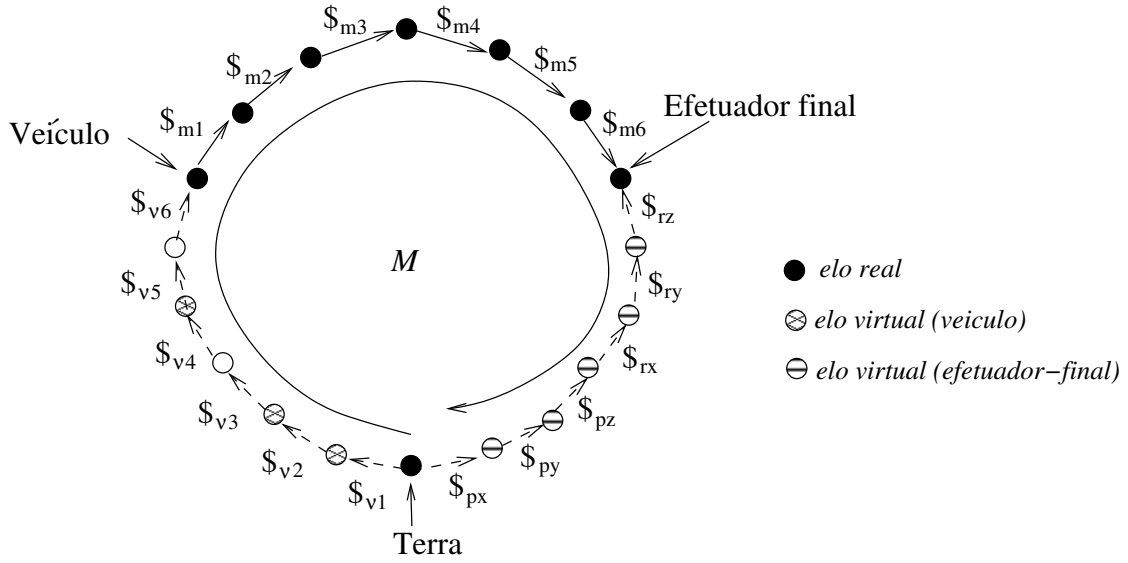


Figura 4.1: Aplicação da técnica de Davies ao SVMS

Figura 4.2: Digrafo de acoplamento  $G_C$  do SVMS

Figura 4.3: Digrafo de movimento  $G_M$  do SVMS

$$\hat{\$}_V = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{v1} & \hat{\$}_{v2} & \hat{\$}_{v3} & \hat{\$}_{v4} & \hat{\$}_{v5} & \hat{\$}_{v6} \end{bmatrix}; \quad (4.2)$$

$$\hat{\$}_M = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{m1} & \hat{\$}_{m2} & \hat{\$}_{m3} & \hat{\$}_{m4} & \hat{\$}_{m5} & \hat{\$}_{m6} \end{bmatrix}; \quad (4.3)$$

$$\hat{\$}_E = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{rz} & \hat{\$}_{ry} & \hat{\$}_{rx} & \hat{\$}_{pz} & \hat{\$}_{py} & \hat{\$}_{px} \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Com base no sentido da malha  $M$  do digrafo  $G_M$  é obtida a matriz de malhas  $B$  como

$$B = \begin{bmatrix} \vec{1} & \vec{1} & -\vec{1} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

onde  $\vec{1}$  é um vetor unitário de dimensão  $1 \times 6$ .

A matriz de rede modificada  $N$  é obtida através da Eq.(4.5) como

$$N = \begin{bmatrix} \hat{\$}_V & \hat{\$}_M & -\hat{\$}_E \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

O vetor de magnitudes correspondentes é

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_V & \Psi_M & \Psi_E \end{bmatrix}^T \quad (4.7)$$

onde

$$\Psi_V = \begin{bmatrix} \Psi_{\nu 1} & \Psi_{\nu 2} & \Psi_{\nu 3} & \Psi_{\nu 4} & \Psi_{\nu 5} & \Psi_{\nu 6} \end{bmatrix}^T ; \quad (4.8)$$

$$\Psi_M = \begin{bmatrix} \Psi_{m1} & \Psi_{m2} & \Psi_{m3} & \Psi_{m4} & \Psi_{m5} & \Psi_{m6} \end{bmatrix}^T ; \quad (4.9)$$

$$\Psi_E = \begin{bmatrix} \Psi_{rz} & \Psi_{ry} & \Psi_{rx} & \Psi_{pz} & \Psi_{py} & \Psi_{px} \end{bmatrix}^T . \quad (4.10)$$

De forma compacta, a forma geral da equação de restrição pode ser reduzida a

$$[N] [\Psi] = [0] , \quad (4.11)$$

onde,  $N$  é a matriz de rede que contém os heligiros normalizados e  $\Psi$  é o vetor das magnitudes (velocidades) dos heligiros.

Para resolver a cinemática direta, seleciona-se as magnitudes das velocidades correspondentes ao espaço operacional (representada por pares cinemáticos virtuais) como as componentes do vetor primário  $\Psi_p$  e as magnitudes dos pares cinemáticos do *SVM* como as componentes do vetor secundário  $\Psi_s$ . Assim, a matriz  $N$  é reorganizada em duas submatrizes e o vetor de amplitudes  $\Psi$  subdividido em dois subvetores em função das magnitudes primárias e secundárias.

$$\begin{bmatrix} N_s & N_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_s & \Psi_p \end{bmatrix}^T = 0. \quad (4.12)$$

Portanto, é possível expressar as juntas secundárias, como uma função das variáveis independentes ou primárias. As matrizes primária e secundária e suas respectivas magnitudes resultam:

$$\begin{aligned} N_p &= [\hat{\$}_V \ \hat{\$}_M], \\ N_s &= \hat{\$}_E, \\ \Psi_p &= [\Psi_V \ \Psi_M]^T, \\ \Psi_s &= \Psi_E. \end{aligned} \quad (4.13)$$

As magnitudes dos pares cinemáticos secundários, ou seja, as velocidades do efetuador-final no sistema Cartesiano, são calculadas através do reagrupamento da Eq. (4.12),

$$\Psi_s = -[N_s]^{-1} N_p \Psi_p. \quad (4.14)$$

Na Eq. (4.14), a matriz secundária necessita ser invertida. Isto pode ser desenvolvido desde que a matriz secundária tenha posto completo e assim sendo sempre inversível.

## 4.2 Cinemática Inversa do *SVMS*

Para obter as velocidades do veículo e das juntas do manipulador, dadas as velocidades do efetuador-final (cinemática inversa), seleciona-se as magnitudes das velocidades do *SVMS* como as componentes do vetor das magnitudes primárias  $\Psi_p$  e as magnitudes das velocidades correspondentes ao espaço operacional (pares cinemáticos virtuais) como as componentes do vetor das magnitudes das velocidades secundárias  $\Psi_s$ . Neste caso, a matriz primária resulta em

$$N_p = \begin{bmatrix} -\hat{\$}_{rz} & -\hat{\$}_{ry} & -\hat{\$}_{rx} & -\hat{\$}_{pz} & -\hat{\$}_{py} & -\hat{\$}_{px} \end{bmatrix}, \quad (4.15)$$

enquanto a matriz secundária resulta em

$$N_s = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{\nu 1} & \hat{\$}_{\nu 2} & \hat{\$}_{\nu 3} & \hat{\$}_{\nu 4} & \hat{\$}_{\nu 5} & \hat{\$}_{\nu 6} & \hat{\$}_{m 1} & \hat{\$}_{m 2} & \hat{\$}_{m 3} & \hat{\$}_{m 4} & \hat{\$}_{m 5} & \hat{\$}_{m 6} \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

Novamente, para calcular as magnitudes dos pares secundários, necessita-se inverter a matriz secundária. Entretanto, observa-se que a matriz  $N_s$  claramente não pode ser invertida porque a mesma possui doze colunas e apenas seis linhas. No sentido de contornar esta limitação, a próxima seção apresenta o método das Restrições Cinemáticas, o qual arbitra velocidades do sistema para resolver sua redundância.

## 4.3 Restrições Cinemáticas

Devido à necessidade de tornar a matriz inversível, ou seja, quadrada, é necessário especificar seis magnitudes de velocidades suplementares considerando, por exemplo, *critérios ener-*



*géticos*. Estes critérios energéticos podem estabelecer que devido a determinado formato geométrico do veículo, o mesmo precise alinhar-se com a correnteza e se movimentar o mínimo possível de forma coordenada com a tarefa do efetuador, como sugerida por [Antonelli and Chivaverini, 1998]. Portanto, isto pode ser feito através da especificação das componentes rotativas das velocidades do veículo no sentido de alinhamento do mesmo com a correnteza e arbitrando como sendo nulas as velocidades lineares do mesmo. Estas prerrogativas facilitam a obtenção da cinemática inversa permitindo a aproximação proposta apenas escolhendo adequadamente as magnitudes das velocidades primárias e secundárias.

Assim, a matriz  $N$  é reorganizada em duas submatrizes e o vetor de amplitudes subdividido em dois subvetores em função das magnitudes primárias e secundárias.

$$[N] [\Psi] = [0], \quad (4.17)$$

$$\begin{bmatrix} N_s & N_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_s & \Psi_p \end{bmatrix}^T = 0, \quad (4.18)$$

onde, de acordo com os critérios adotados, tem-se

$$\begin{aligned} N_p &= [\hat{\$}_V \ \hat{\$}_E], \\ N_s &= \hat{\$}_M, \\ \Psi_p &= [\Psi_V \ \Psi_E]^T, \\ \Psi_s &= \Psi_M. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Portanto, o vetor das velocidades secundárias é dado por

$$\Psi_s = -[N_s]^{-1} N_p \Psi_p. \quad (4.20)$$

De posse da Eq. (4.17), a aceleração é facilmente obtida, através da regra de diferenciação do produto, seguida de um reagrupamento das submatrizes e subvetores. Este processo é destacado a seguir.

- Aplicação da diferenciação do produto:

$$\dot{N}\Psi + N\dot{\Psi} = 0. \quad (4.21)$$

- Reagrupamento:

$$N\dot{\Psi} = -\dot{N}\Psi. \quad (4.22)$$

- Expansão matricial para evidenciar as submatrizes:

$$\begin{bmatrix} N_s & N_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\Psi}_s & \dot{\Psi}_p \end{bmatrix}^T = -\dot{N}\Psi. \quad (4.23)$$

- Obtenção das acelerações das juntas passivas:

$$\dot{\Psi}_s = - (N_s)^{-1} \left( N_p \dot{\Psi}_p + \dot{N}\Psi \right), \quad (4.24)$$

A Eq. (4.24) representa a formulação da aceleração para o método de Davies, obtida em [dos Santos, 2003b, dos Santos, 2003c] e é aplicada ao sistema robótico veículo-manipulador submarino.

Devido ao uso de helicóides para representar os movimentos envolvidos, esta aproximação permite também escolher sistemas de referência nos quais esta representação seja simplificada, tornando a matriz secundária  $N_s$  mais esparsa consequentemente facilitando sua inversão. Caso seja necessário, esta proposta permite a introdução de restrições cinemáticas adicionais de forma simples usando cadeias cinemáticas virtuais adicionais. Isto pode ser implementado no sentido de aumentar a manipulabilidade do sistema como analisado e computacionalmente implementado em [dos Santos, 2003a, dos Santos et al., 2005a, dos Santos et al., 2005b, dos Santos et al., 2006f] para o caso de um robô redundante de quatro graus de liberdade.

## 4.4 Conclusões

Este capítulo apresentou a modelagem das cinemáticas direta e inversa do SVMS. Na cinemática direta a matriz secundária é quadrada. O mesmo não acontece na obtenção da cinemática inversa, o que implicou a proposição do método das Restrições Cinemáticas. Este método permite que através de critérios energéticos, as velocidades do veículo sejam arbitradas como nulas para movimentos de translação e de reorientação com a correnteza para movimentos rotativos e assim, a cinemática inversa possa ser concebida. Por outro lado, a imposição de velocidades nulas ao veículo pode implicar uma possível postura singular do manipulador durante o desenvolvimento de alguma tarefa. Portanto, o movimento do veículo torna-se necessário para evitar que tal postura ocorra e, neste sentido, o próximo capítulo apresenta conceitos fundamentais para as técnicas utilizadas para desenvolver o movimento do veículo. Estas técnicas impõem ou cancelam movimentos ao veículo para garantir a coordenação do movimento entre o veículo e o manipulador, contornando o problema das posturas singulares.

# Capítulo 5

## Conceitos Cinemáticos Qualitativos

*Neste capítulo é desenvolvido um conjunto de conceitos que serão utilizados nos capítulos posteriores em abordagens de quantificação, reflexão ou regulação cinemática.*

### 5.1 Introdução

O problema a ser enfrentado consiste na forma de acionamento do veículo, quando o mesmo parte do repouso procurando evitar que o manipulador montado sobre ele alcance uma configuração singular. A técnica responsável por este acionamento deve realizá-lo de forma suficientemente suave pois de outra forma, acontece uma propagação de descontinuidades nas velocidades das juntas subsequentes da cadeia cinemática.

No intuito de formular propostas para este tipo de acionamento, apresenta-se neste capítulo um conjunto de conceitos fundamentais para a concepção destas propostas, tais como um índice de quantificação do desempenho, uma proposta de reflexão cinemática e a regulação cinemática. A quantificação serve como elemento de monitoração de aproximação da singularidade, o qual sinaliza quando o veículo deve se mover ou parar. Enquanto isso, a abordagem de reflexão baseia-se numa forma hipotética de evitar singularidades, através de uma contínua inversão do desempenho. Finalmente, a abordagem de regulação realiza funções tanto de controle do acionamento do veículo, como de sua distribuição de graus de liberdade.

## 5.2 Alguns índices de desempenho cinemático

Quando um índice de desempenho é selecionado, características como invariabilidade diante de transformações de coordenadas, consistência dimensional, representação quantitativa de singularidades e significado físico devem ser consideradas [Voglewede, 2004, Park and Yang, 2002]. A característica de invariabilidade significa que a quantidade não se altera diante da mudança de localização ou orientação do sistema de coordenadas. A característica de consistência dimensional estabelece que todos os componentes da matriz Jacobiana devem ter a mesma unidade.

Durante as últimas três décadas, muitos pesquisadores propuseram vários índices de desempenho para robôs redundantes e alguns destes índices são destacados a seguir.

### 5.2.1 Manipulabilidade

Yoshikawa [Yoshikawa, 1987] apresentou a medida de manipulabilidade.

$$\omega = \sqrt{\det(JJ^T)}. \quad (5.1)$$

Este índice de desempenho calcula a aproximação da singularidade baseada no volume de um elipsóide. Este elipsóide é maximizado de forma a aumentar a destreza do robô. Caso contrário, em condições singulares, este elipsóide transforma-se num cilindro e o movimento do efetuador fica incapacitado em algumas direções. Entretanto, o cálculo de  $JJ^T$  introduz uma inconsistência dimensional, como já foi comentado no capítulo 3. Portanto, não apresenta significado físico.

### 5.2.2 Número condicionamento

[Salisbury and Craig, 1982] propuseram o número de condicionamento que indica a uniformidade do Jacobiano em relação a direção (*isotropia*). Este número é calculado por,

$$Cond(J) = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}, \quad (5.2)$$

onde,  $J$  é a matriz Jacobiana  $m \times n$  ( $n$  e  $m$  são os dof's das juntas e da tarefa respectivamente),  $\sigma_{max}$  e  $\sigma_{min}$  são o máximo e o mínimo valores singulares.

Contudo, devido à decomposição em valores singulares, este índice apresenta inconsistência dimensional quando a matriz apresenta termos de diferentes unidades físicas [Voglewede, 2004].

### 5.2.3 Mínimo valor singular

Klein e Blaho [Klein and Hunag, 1983] pesquisaram o mínimo valor singular de um Jacobiano como uma medida de destreza. Eles sugeriram que este valor varia de forma mais radical que outros valores singulares quando a matriz encontra-se próxima de singularidades.

$$MSV = \sigma_{min}. \quad (5.3)$$

### 5.2.4 Menores do Jacobiano

A proposta de [Chang, 1989] consiste na medição dos menores do Jacobiano, feita por:

$$H = \left| \prod_{i=1}^l \delta_i \right|^{1/l}, \quad (5.4)$$

onde  $\delta_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, l$ ) são os menores do posto  $m$  da matriz Jacobiana e  $l = C_{n,m}$ . Mais especificamente,  $C_{n,m} = n!/(m!(n-m)!)$  é a combinação simples de  $n$  elementos distintos tomados  $m$  a  $m$ , como subconjuntos formados por  $m$  elementos distintos escolhidos entre os  $n$  elementos dados, onde  $n$  é o número de graus de liberdade das juntas. Assim, à medida que a redundância aumenta, o número de menores aumenta proporcionalmente a  $C_{n,m}$ , o que exige maior custo computacional [Park and Yang, 2002].

## 5.3 Proposta de um índice de desempenho cinemático normalizado

Como destacado na seção anterior, a aproximação de um manipulador de uma configuração singular pode ser mensurada através de várias opções de índices de desempenho, como a manipulabilidade, usualmente definida como

$$\omega = |\det(J(q))|. \quad (5.5)$$

onde  $J(q)$  é a matriz *Jacobiana* de um manipulador não redundante. Esta medição de manipulabilidade é de fácil computação. Entretanto, seu valor numérico não constitui uma medida absoluta da aproximação da singularidade. Neste sentido, esta Tese propõe um índice normalizado.

Este índice (denominado  $\gamma$ ) é definido como a razão absoluta entre o determinante da matriz secundária  $\det(N_s)$  e o valor deste mesmo determinante sobre uma determinada vizinhança da singularidade dada por  $(q_{vs})$ . Assim, o índice de desempenho resulta em:

$$\gamma = \left| \frac{\det(N_s)}{\det(N_s(q_{vs}))} \right|. \quad (5.6)$$

A escolha de uma vizinhança de singularidade segue um critério prático, admitindo uma aproximação da saturação das velocidades sob um determinado ângulo que representa uma vizinhança da configuração singular.

A Eq. (5.6) utiliza a notação *por unidade* (*pu*). Esta notação tem uma vasta aplicação em sistemas elétricos de potência, onde as constantes de transformação das máquinas elétricas caem numa faixa numérica razoável. Além disso, a correção de valores nesta faixa é então sujeita a uma rápida aproximação [Fitzgerald et al., 1971]. A notação por unidade apresenta outra vantagem. Ela apresenta importantes informações sobre o projeto e desempenho do equipamento [Del Toro, 1994].

Por estas vantagens, o índice definido em (5.6) tem importantes características. Ele é dimensionalmente consistente e reforça o critério de representação quantitativa da aproximação da singularidade. A consistência dimensional é garantida por este índice utilizar a matriz quadrada  $N_s$  ao contrário da habitual matriz  $JJ^T$  para manipuladores redundantes, como no índice de manipulabilidade [Yoshikawa, 1987]. Além disso, de acordo com [Murray et al., 1994], o determinante de uma matriz Jacobiana não se altera com a mudança de sistema de coordenadas ou de unidades.

Se o índice  $\gamma$  for maior que a unidade, a configuração do manipulador não está na vizinhança

da singularidade. Quando o valor de  $\gamma$  for menor que a unidade, a aproximação da singularidade é detectada.

Em termos da necessidade de movimento do veículo, se o índice  $\gamma$  é maior que a unidade, significa que o veículo pode manter um estado de repouso. Por outro lado, quando  $\gamma$  alcançar um valor inferior a unidade, significa que o veículo precisa se deslocar.

A próxima seção apresenta um conceito de IA, baseado no comportamento dos seres vivos, adaptado para resolução da redundância do *SVMS*.

## 5.4 O conceito de agente reflexivo

### 5.4.1 Introdução

Nas últimas décadas, pesquisas em Inteligência Artificial buscam simular o comportamento primitivo dos animais em programas computacionais. Estas pesquisas baseiam-se em estudos biológicos que relatam como um animal pode influenciar em seu ambiente de forma autônoma e efetiva.

O comportamento de uma animal pode ser interpretado como um mecanismo que possibilita a este animal sobreviver, transformando a informação recebida do ambiente em ações que o mantenham afastado de situações de risco. Estas ações também modificam as proximidades daquele ambiente.

Neste sentido, abordagens bastante promissoras têm analisado os mecanismos comuns usados por animais em sua luta por sobrevivência. A investigação de como adaptar estes mecanismos em técnicas para projeto e desenvolvimento de programas, denominados de agentes autônomos tem sido objeto de interesse [Anderson and Donath, 1990, Beer, 1991].

Existe uma variedade de comportamentos observados nos animais. Assim, a nomenclatura e a classificação pode variar entre diferentes pesquisadores. Uma das formas de classificação baseia-se na ciência que estuda o comportamento dos seres vivos, denominada de *Etologia*. De forma geral, a *Etologia* é o estudo do comportamento animal baseado na observação sistemática, na gravação, e na análise de como os animais funcionam, com atenção especial aos aspectos



evolucionários. Um dos comportamentos observados é o reflexivo. Este comportamento é classificado como o mais simples, no qual uma resposta é deflagrada por um estímulo ambiental, como em [Beer, 1991].

Na próxima seção apresenta-se uma forma de resolver a redundância do SVMS inspirada no comportamento reflexivo.

### 5.4.2 Implementação do comportamento reflexivo

Ao longo de uma cadeia cinemática existem juntas (rotativas ou prismáticas) que podem ser definidas como secundárias ou primárias segundo a formulação de Davies [Campos et al., 2003]. O problema de definir a velocidade de certas juntas primárias concentra-se no tipo de critério considerado.

Para tanto, sabe-se que, como destacado em [dos Santos, 2003a, dos Santos, 2003b], o helicíde que define a velocidade do efetuador-final em relação à terra, representado num sistema de coordenadas adequado, é fornecido pelo seguinte somatório

$$\$_E = \sum_{i=1}^n \$_i. \quad (5.7)$$

Assim é razoável que as juntas intermediárias desta cadeia cinemática tenham seus movimentos definidos como parcelas deste somatório.

Como destacado no capítulo 2, um heligiros é dado por  $\$_ = (\omega; V_p)^T$ . A cadeia cinemática que representa o movimento do SVMS é constituída destes heligiros, onde o movimento das juntas prismáticas representam os movimentos puramente de translação ( $V_p$ ), e o movimento de uma junta esférica representa os movimentos puramente rotativos ( $\omega$ ).

Estes movimentos rotativos comumente seguem algum critério energético associado à hidrodinâmica do ambiente como em [Antonelli and Chiaverini, 1998]. Por outro lado, além de critérios energéticos que visam poupar o sistema de atuação, os movimentos translacionais do veículo devem ser compatíveis com o movimento do efetuador. Esta compatibilidade é justificada em tarefas onde o movimento do manipulador não é o suficiente para sua conclusão, o que pode conduzir o manipulador a posturas singulares.

Neste sentido, admitindo a Eq. (5.7), propõe-se que o movimento translacional do veículo  $V_{pV}$  seja considerado como uma parcela do movimento translacional do efetuator  $V_{pE}$ , logo,

$$V_{pV} = \alpha V_{pE}. \quad (5.8)$$

A parcela  $\alpha$  representa a ação que tende a movimentar o veículo no sentido de reagir diante da singularidade. Em outras palavras, admite-se que  $\alpha$  seja um agente que simule um comportamento reflexivo do veículo diante da aproximação da singularidade. Um forma simples de implementar este comportamento baseia-se numa função inversa ao desempenho como apresentada abaixo,

$$\alpha = \frac{1}{\gamma}. \quad (5.9)$$

Assim, o sistema é conduzido para a posição que tende a maximizar seu desempenho quando o mesmo apresentar um decaimento e vice-versa. Entretanto, para garantir um consumo energético mais econômico do sistema de atuação, deseja-se que este reflexo seja ativado apenas em situações próximas da singularidade, de outra forma o veículo deve permanecer parado. Este tipo de atuação induz ao estudo de outro tipo de comportamento denominado reativo e será abordado com mais detalhes no próximo capítulo. Entretanto, adianta-se que, dependendo de como seja implementado, este comportamento pode introduzir uma indesejável característica descontínua ao sistema. Em virtude desta característica indesejável, a próxima seção apresenta o conceito de regulação adaptada para a cinemática. Este conceito pretende sintetizar as informações do desempenho  $\gamma$  e de seu respectivo reflexo  $\alpha$  numa expressão determinística. Esta expressão será posteriormente utilizada como parte do treinamento de uma rede neural que suaviza a atuação do agente reflexivo.

## 5.5 O conceito de regulação cinemática

O conceito de regulação, bastante difundido na teoria de sistemas elétricos de potência [Fitzgerald et al., 1971, Kosow, 1996, Del Toro, 1994], é adaptado neste trabalho para duas aplicações

no controle cinemático que pretende-se desenvolver. Esta seção trata da primeira delas, associada ao desempenho cinemático. Antes porém, para uma melhor compreensão desta adaptação, apresenta-se como premissa a aplicação da regulação em problemas de sistemas elétricos.

A regulação de tensão num gerador elétrico é fornecida por

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}}, \quad (5.10)$$

onde  $VR$ ,  $V_{FL}$  e  $V_{NL}$  são a regulação de tensão percentual e as tensões terminais em plena carga e sem carga respectivamente. A equação (5.10) serve para indicar de forma relativa quanto variou a tensão do sistema quando uma carga é acrescida ao mesmo. Ou seja, quanto de tensão deve ser fornecido pelo gerador elétrico para que a tensão original seja reestabelecida.

A partir desta premissa baseada em sistemas elétricos, considera-se neste trabalho que a regulação de tensão tenha um tratamento análogo aplicado a sistemas cinemáticos, ou seja, a concepção de uma regulação de reatividade. Para tanto, admite-se as seguintes hipóteses:

1. Considerar a singularidade como a carga cinemática que interrompe o fluxo contínuo da trajetória do efetuador. Desta forma, a vizinhança da singularidade é vista como uma carga imposta ao sistema cinemático quando a mesma é detectada pelo desempenho  $\gamma$ .
2. Partindo da hipótese anterior e admitindo que o sistema não reaje diante de uma aproximação da singularidade, interpreta-se o desempenho como a situação em que o sistema cinemático está sob a carga de singularidade ( $\gamma \equiv V_{FL}$ );
3. Por fim, admite-se que o sistema cinemático reaje continuamente ao seu desempenho de forma reflexiva e que esta reação garante a ausência de singularidade. Assim, compara-se a reatividade ao caso em que o sistema cinemático está sem carga de singularidade ( $\alpha \equiv V_{NL}$ ).

Com a superposição de cada uma das hipóteses anteriores, cria-se uma analogia entre a regulação  $VR$  com o módulo da regulação cinemática  $\hat{\omega}$ , sendo esta última dada por

$$\hat{\omega} = \left| \frac{\alpha - \gamma}{\gamma} \right|. \quad (5.11)$$

Em termos operacionais do SVMS, a Eq. (5.11) indica de forma relativa quanto de movimento deve ser fornecido pelo veículo para que o desempenho esteja afastado da condição de singularidade. Esta regulação agrega informações diretamente relacionadas ao mapeamento entre entrada ( $\gamma$ ) e saída ( $\alpha$ ) do sistema. Esta última consiste numa ação de controle hipotética que o sistema desenvolveria para escapar da singularidade. Por estas informações incorporadas na regulação cinemática, a mesma é posteriormente utilizada como um fator que determina automaticamente as inclinações das funções hiperbólicas que compõem a máquina funcional (ver capítulo 6).

### 5.5.1 A regulação reduzida do desempenho

Esta seção destaca a segunda aplicação do conceito de regulação, o qual constitui o controle cinemático da máquina funcional. Esta aplicação tem o objetivo de quantificar a tendência que o sistema cinemático tem em ficar parado. Neste caso, admite-se que a condição de movimento seja uma carga aplicada à condição estática e as seguintes hipóteses são estabelecidas:

1. Considerar que o sistema cinemático esteja inicialmente afastado da vizinhança da singularidade, ou seja,  $\gamma > 1$ . Nesta faixa de valores, admite-se que o veículo não precisa se movimentar.
2. Partindo da hipótese anterior, admite-se que o valor unitário seja a fronteira de valores de desempenho onde o veículo pode permanecer estático. Em outras palavras, interpreta-se o valor unitário como o valor limite sem carga de movimento ( $1 \equiv V_{NL}$ );
3. Como a condição de movimento é considerada como uma carga, compara-se a reatividade ao caso em que o sistema cinemático está sob a influência desta carga ( $\alpha \equiv V_{FL}$ ).

Em síntese, a superposição de cada uma das hipóteses anteriores cria uma analogia entre a regulação  $VR$  com a tendência de repouso, o que resulta na seguinte regulação reduzida de desempenho,

$$\tilde{\omega} = \left| \frac{1 - \alpha}{\alpha} \right|. \quad (5.12)$$

## 5.6 Conclusões

Este capítulo revisou alguns índices de desempenho convencionais e suas respectivas limitações. Propôs-se um índice de desempenho baseado na notação por unidade e argumentos para sua proposição. Em seguida, a apresentação dos conceitos de reflexão e regulação cinemáticas propõem respectivamente formas de reação do sistema diante da singularidade e de incorporar conhecimento a esta reação. Estes conceitos são fundamentais para a concepção das técnicas apresentadas nos capítulos posteriores.

## Capítulo 6

# Solução da Redundância dos Sistemas Veículo-Manipulador Submarinos através de uma Máquina Funcional Reativa

*Neste capítulo, apresenta-se uma técnica para atuação do veículo submarino, denominada de Máquina Funcional Reativa. Esta máquina é formada por uma combinação linear de funções. Estas funções utilizam os conceitos desenvolvidos no capítulo anterior como entradas e como métodos de ponderação destas entradas. Propõe-se que entradas adicionais sejam extraídas de uma superfície de polarização. Além disso, esta superfície representa o modelo matemático do movimento desejado do veículo. Para conceber este modelo, agrega-se à estrutura da máquina um agente reativo, o qual ativa ou desativa o movimento do SVMS. Por fim, propõe-se uma nova topologia que reforça o mapeamento entre as entradas e a saída da Máquina Funcional Reativa.*

### 6.1 Introdução

De acordo com [Barreto, 2001], um paradigma de programação corresponde ao estilo de programação e o funcional é um destes estilos.

A solução de um problema em programação funcional é desenvolvida considerando que este

problema seja um objeto matemático  $(D, R, q)$  onde  $D$  são as entradas,  $R$  são os resultados possíveis e  $q$  é a relação binária expressando a condição do problema. Assim, solucionar um problema é encontrar uma função ' $f$ ' de modo que  $f : D \rightarrow R$  corresponde à condição  $q$ .

As funções podem ser manipuladas em uma grande variedade de formas em programação funcional. As funções são tratadas como valores de primeira importância, o que significa que funções podem ser parâmetros ou valores de entrada para outras funções e podem ser os valores de retorno ou saída de uma função [Cousineau and Mauny, 1998]. Assim, uma combinação de funções pode ser feita com o objetivo de aproximação de uma nova função materializando a solução do problema.

Portanto, um programa pode ser visto como uma implementação da função  $f$ , a qual é uma entidade matemática que trabalha como uma máquina, recebendo material bruto e retornando produtos finais [Barreto, 2001].

Como destacado no capítulo anterior, o problema que esta tese aborda consiste no tipo de movimento que o veículo submarino deve realizar. Este movimento deve ser efetuado apenas quando o manipulador encontra-se próximo de posturas singulares, de outra forma, o veículo deve permanecer em repouso. Por outro lado, a transição da condição de movimento para a condição de repouso e vice-versa, deve ser suficientemente suave para evitar descontinuidades nas velocidades das juntas que compõem a cadeia cinemática do SVMS. Em termos de programação funcional, a entrada  $D$  é o desempenho cinemático  $\gamma$  (ver capítulo 5), o qual informa a aproximação ou o afastamento de uma postura singular. Os resultados possíveis  $R$  são as condições de movimento ou de repouso. A relação binária  $q$  relaciona o desempenho cinemático  $\gamma$  às condições de movimento ou de repouso.

O objetivo desta capítulo é solucionar o problema de acionamento do veículo através de uma máquina funcional. Esta máquina é constituída de várias funções, que linearmente combinadas, desenvolvem o movimento do SVMS. O monitoramento entre as condições de repouso e movimento é desenvolvido por um agente reativo, incorporado à estrutura da máquina funcional. Nesta tese, esta máquina denomina-se Máquina Funcional Reativa e destina-se ao controle do movimento do SVMS.

## 6.2 Fundamentos teóricos

Esta seção apresenta os requisitos necessários para a concepção da Máquina Funcional Reativa. Para tanto, apresenta-se inicialmente a unidade computacional básica desta máquina e em seguida, desenvolve-se uma breve abordagem sobre a propriedade de aproximação universal da mesma.

### 6.2.1 A unidade computacional básica

A unidade computacional básica da Máquina Funcional é apresentada na Fig. 6.1. Estas unidades são interconectadas por conexões com valores variáveis denominados pesos.

Em essência, um conjunto de entradas (vetor  $X$ ) é aplicado à uma função, cada uma representando uma saída de uma outra função. Cada entrada é multiplicada por um peso correspondente (vetor  $W$ ). Os pesos das entradas são somados para determinar o nível de ativação da função, este adicionado a um valor limite,  $\theta_p$ , conhecido por polarização ou *bias*. Em outras palavras, esta soma ponderada de entradas é aplicada a uma função de ativação não-linear, contínua e diferenciável.

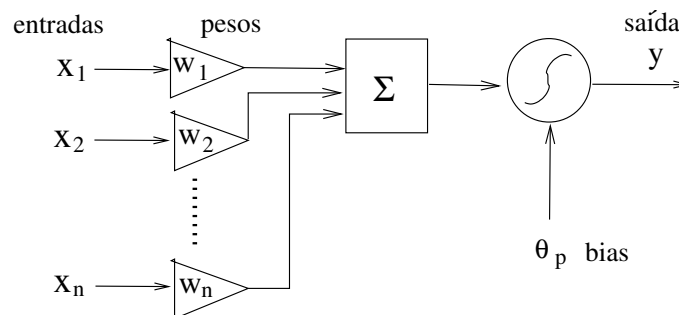


Figura 6.1: Estrutura da unidade computacional

A saída da unidade computacional da Fig. 6.1 pode ser expressa na seguinte forma:

$$y = f \left( \sum_{i=1}^n w_i x_i + \theta_p \right), \quad (6.1)$$



onde  $f$  é a função de ativação,  $x_i$  é o conjunto de entradas e  $w_i$  são os pesos correspondentes às entradas da função. A soma ponderada ( $\sum_{i=1}^n w_i x_i$ ) denomina-se de entrada efetiva.

Algumas das funções de ativação são:

- sigmóide:

$$\text{sig}(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} \quad (6.2)$$

- tangente hiperbólica:

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (6.3)$$

Na próxima seção, apresenta-se um fundamento de estabilidade útil para uma melhor compreensão de resultados posteriores.

### 6.2.2 Estabilidade

Considerando um sistema não-linear

$$\dot{x} = g(x, u, t), \quad y = h(x, t), \quad (6.4)$$

com o estado  $x(t) \in R^n$ . O ponto de equilíbrio  $x_e$  é dito uniformemente limitado se existe um conjunto compacto  $S \subset R^n$ , então para todo  $x_0 \in S$  existe um  $\epsilon > 0$  e um número  $T(\epsilon, x_0)$  tal que  $\|x(t) - x_e\| < \epsilon$  para todo  $t \geq t_0 + T$ . Ou seja, após um período de transição  $T$ , o estado  $x(t)$  permanece no interior de uma esfera de raio  $\epsilon$  em torno de  $x_e$  [Selmié and Lewis, 2000a].

Esta definição estabelece que a continuidade em relação a um estado inicial implica que sejam arbitradas soluções próximas de uma vizinhança num instante  $t$  fazendo uma mudança no estado inicial num instante  $t_0$  suficientemente pequena [Khalil, 2002, Vincent and Grantham, 1997]. A seção seguinte utiliza este resultado para realizar uma aproximação de qualquer função contínua através da superposição de funções sigmoidais.

### 6.2.3 Aproximação universal de funções

Os resultados de [Cybenko, 1989] para aproximação de funções contínuas mostram que para uma função qualquer  $f \in C(S)$ , com um conjunto compacto  $S$  de  $R^n$ , e qualquer  $\epsilon > 0$ , existe uma soma  $G(x)$

$$G(x) = \sum_{i=0}^L \alpha_k \sigma(m_k^T x + n_k) \quad (6.5)$$

para algum  $m_k \in R^n$ ,  $n_k \in R$ ,  $\alpha_k \in R$ , tais que

$$|G(x) - f(x)| < \epsilon \quad (6.6)$$

para todo  $x \in S$ . A função  $\sigma(\cdot)$  pode ser qualquer função sigmoideal [Cybenko, 1989]. Este resultado mostra que qualquer função contínua pode ser bem aproximada através de uma combinação linear de funções sigmoideais [Selmié and Lewis, 2000b, Selmié and Lewis, 2000a]. Este resultado denomina-se *propriedade de aproximação universal de funções* e permite que, no caso do SVMS, descontinuidades sejam evitadas durante o acionamento do veículo.

Neste sentido, propõe-se o desenvolvimento de uma  $G(x)$  que aproxime-se o melhor possível de uma função  $f(x)$ , a qual descreve um movimento ideal do veículo, com o objetivo de reduzir o erro de aproximação  $\epsilon$ .

Esta proposta é apresentada com mais detalhes na próxima seção.

## 6.3 A máquina funcional reativa

Como destacado anteriormente, a propriedade de aproximação universal diz que funções podem ser linearmente combinadas de forma a aproximarem de uma função contínua qualquer. Neste sentido, esta seção apresenta uma proposta de ativação inspirada nesta propriedade. Esta ativação denomina-se de Máquina Funcional Reativa e agrega uma combinação de funções que manipulam informações dos conceitos cinemáticos apresentados no capítulo 5.

### 6.3.1 Estrutura geral

A Fig. 6.2 apresenta uma topologia de uma Máquina Funcional Reativa, onde a combinação linear das funções é organizada em camadas. As funções que recebem as entradas da máquina ( $x_1 \dots x_n$ ) compõem a camada de entrada, a última função é a de saída. As funções entre a camada de entrada e a saída compõem a camada intermediária.

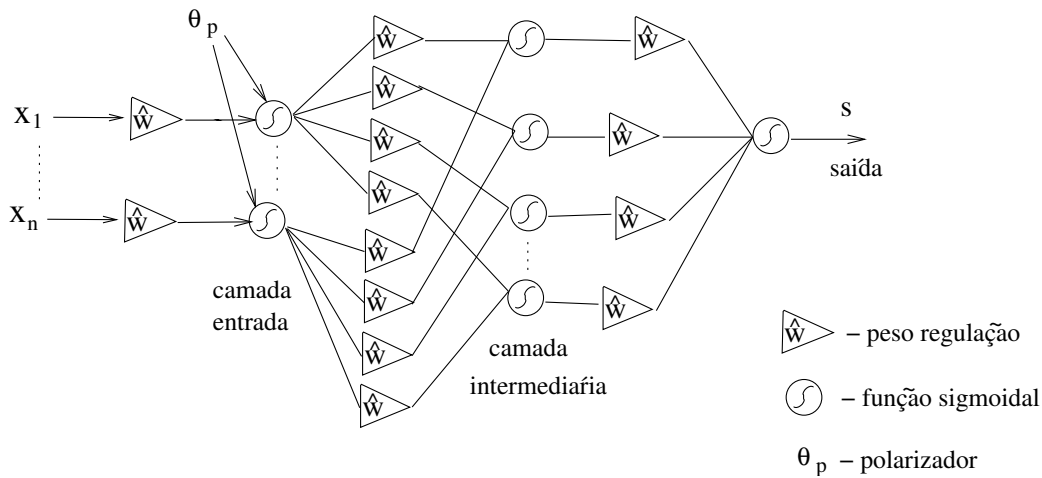


Figura 6.2: Máquina Funcional Reativa.

A saída desta rede é dada pela seguinte equação

$$s = f \left( \sum_{k=1}^r w_k \left\{ f \left( \sum_{j=1}^L \left[ w_{kj} f \left( \sum_{k=1}^n w_{jk} x_k + \theta_{p_k} \right) \right] \right) \right\} \right), \quad (6.7)$$

onde  $f(\cdot)$  são funções de ativação. Existem várias funções deste tipo, incluindo a tangente hiperbólica e sigmóides.  $L$  e  $r$  são os números de funções das camadas intermediária e de saída respectivamente. O polarizador  $\theta_p$  atua como um agente reativo, o qual é apresentado com mais detalhes a seguir. As primeiras interconexões são ponderadas por  $w_{jk}$ , as segundas interconexões são ponderadas por  $w_{kj}$  e as terceiras interconexões são ponderadas por  $w_k$  na saída da máquina.

A próxima subseção apresenta uma proposta de superfície de controle que descreve o movimento desejado do veículo e tem o objetivo de abstrair possíveis entradas para a máquina funcional. Estas entradas procuram manter o desempenho ( $\gamma$ ) do SVMS dentro dos limites desta superfície.

### 6.3.2 Abstração de uma superfície de polarização

Esta seção tem o objetivo de introduzir o conceito da superfície de polarização. A Fig. 6.3 apresenta esta superfície onde o desempenho  $\gamma$  e seu respectivo reflexo  $\alpha$  estão contidos nos limites  $\gamma_{max}$ , 1 e  $\gamma_{tol}$ . Estes limites representam respectivamente: o máximo valor que o desempenho pode assumir para uma dada vizinhança de singularidade  $\theta_{vs}$ , o valor que o desempenho assume quando esta vizinhança é alcançada e o valor mínimo que o desempenho pode alcançar, ou seja o valor menos seguro de desempenho em relação à singularidade.

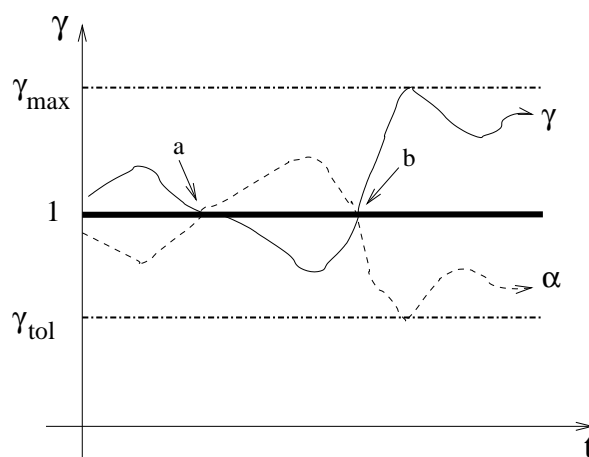


Figura 6.3: Superfície de polarização

Nesta tese, esta superfície possui duas interpretações. A primeira delas, modela o movimento do veículo de acordo com o histórico do índice de desempenho normalizado  $\gamma$ .

Busca-se evitar movimentos desnecessários no veículo, assim, enquanto o desempenho  $\gamma$  estiver na faixa de valores acima da unidade, i.e. ( $1 < \gamma < \gamma_{max}$ ), o veículo permanece parado. Se o desempenho alcançar valores abaixo da unidade, assinalado pela seta *a* na Fig. 6.3, então o veículo começa a adquirir movimento. Este movimento fica habilitado até que um valor  $\gamma_{acel}$  seja alcançado. Este valor pode ser a unidade ou um valor imediatamente superior, onde uma desaceleração passa a reger o veículo até que o valor máximo desempenho ( $\gamma_{max}$ ) seja alcançado. O início da desaceleração é assinalado na Fig. 6.3 pela seta *b*.

Caso o desempenho caia novamente a valores da vizinhança da singularidade, este ciclo de

operação deve se repetir. Nesta tese, admite-se que valores abaixo da tolerância  $\gamma_{tol}$  exigem uma atitude no controle que mude a matriz secundária corrente, substituindo as juntas em condição crítica por outras. Esta situação configura uma condição de controle híbrido. Os resultados deste tratamento são abordados com maior profundidade no capítulo 8.

A segunda interpretação da superfície de polarização é uma consequência da primeira. Ou seja, a partir de uma análise do comportamento associado a superfície, pode-se abstrair informações adicionais sobre o perfil do desempenho  $\gamma$  e do agente reflexivo  $\alpha$  associado.

Propõe-se que a superfície de polarização seja decomposta em intervalos que provêm a variação de  $\gamma$  e  $\alpha$  em relação aos limites da superfície.

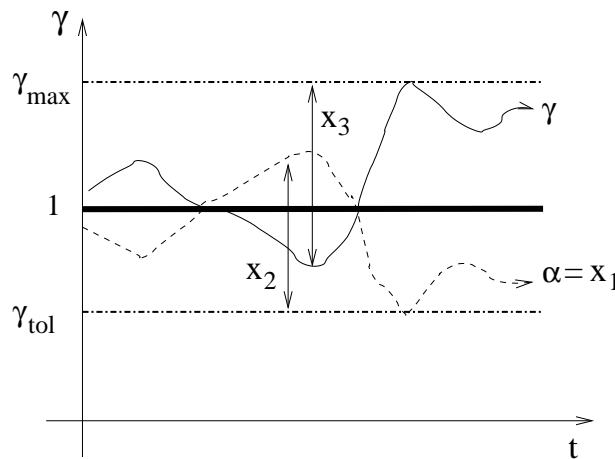


Figura 6.4: Grandezas imperativas da superfície de polarização.

Nota-se na Fig. 6.4 algumas destas informações, onde  $x_2$  e  $x_3$  representam respectivamente: a distância entre o agente reflexivo e o valor de tolerância do desempenho  $|\alpha - \gamma_{tol}|$  e a distância entre o maior valor que o desempenho pode assumir e o desempenho calculado  $|\gamma_{max} - \gamma|$ . Estas informações são imperativas quando a vizinhança de singularidade é detectada, pois estão associadas ao limite superior e inferior da superfície. Entretanto, informações adicionais podem ser extraídas, como as destacadas na Fig. 6.5.

A Fig. 6.5 exhibe algumas destas grandezas, onde  $x_5$  e  $x_6$  representam respectivamente a distância entre o agente reflexivo  $\alpha$  e o desempenho  $\gamma$  em relação à fronteira da vizinhança da singularidade (1). Por outro lado, a grandeza  $x_7$  representa a distância relativa entre  $\alpha$  e  $\gamma$ .

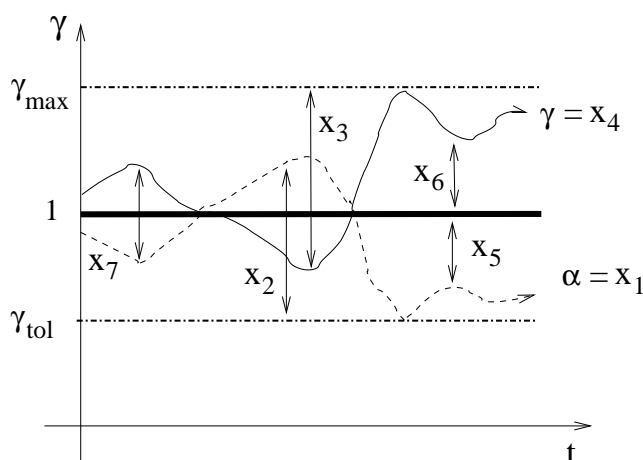


Figura 6.5: Grandezas da superfície de polarização.

Portanto, além do desempenho e de seu agente reflexivo, estas grandezas extraídas da superfície de polarização podem ser utilizadas como entradas para a Máquina Funcional Reativa no sentido de aperfeiçoamento da resposta da mesma.

A próxima subseção revisa o conceito de controle reativo sob o enfoque da *Etologia*. Esta abordagem é utilizada como fundamento para uma posterior interpretação computacional do modelo da superfície de polarização.

### 6.3.3 Controle reativo

Como destacado anteriormente, uma das linhas de pesquisa em IA busca simular o comportamento dos seres vivos adaptando a experiência *Etológica* (ver seção 5.4.1) a programas computacionais denominados de agentes autônomos. Ao contrário do comportamento reflexivo abordado no capítulo 5, a classe de comportamento denominada de reativa ou seqüencial é mais complexa.

Esta complexidade baseia-se na seguinte constatação: uma vez que o ambiente se torna mais hostil, a capacidade de sobrevivência não pode ser mais garantida apenas com comportamentos reflexivos. Assim, pesquisas apontam para a criação de processos evolucionários do comportamento e o comportamento reativo é um deles.

O comportamento reativo é formado por uma série de respostas como reações a um dado estímulo ambiental [Russell and Norving, 2003]. Esta classe de comportamento pode ser descrita por uma máquina de estados, onde cada comportamento está associado a um estado e os arcos representam a interação entre os comportamentos.

Com esta interpretação, desenvolve-se na próxima subseção um agente reativo que simula o modelo da superfície de polarização, de forma a impor o comportamento desejado do veículo.

### 6.3.4 O polarizador como agente reativo

Nesta seção o significado físico da superfície de polarização é interpretado computacionalmente como um agente de reativo incorporado ao polarizador  $\theta_p$ .

Este agente reativo é representado por uma máquina composta pelos estados S1, S2 e S3, onde: S1 é o estado que mantém o veículo em repouso enquanto ( $\gamma \geq 1$ ). Quando o desempenho alcançar a faixa da vizinhança de singularidade ( $\gamma_{tol} < \gamma < 1$ ), o estado de aceleração S2 mantém o veículo em movimento até o desempenho alcançar algum valor maior ou igual a unidade ( $\gamma < \gamma_{accel}$ ). Quando  $\gamma_{accel}$  é alcançado, o estado S3 começa a desacelerar o veículo enquanto  $\gamma < \gamma_{max}$  desde que  $sgn(1 - \alpha) > 0$ . Esta última condição do estado S3 é uma condição de segurança que verifica o sinal de  $1 - \alpha$  no intuito de prever se o veículo pode manter a sua contínua desaceleração até alcançar o estado S1 ou deve retornar à condição de aceleração do estado S2. O processo deste ciclo reativo é ilustrado com mais detalhes na máquina de estados finitos da Fig. 6.6.

As condições matemáticas vinculadas a cada um dos estados anteriores são

$$\theta_p = \begin{cases} -\sum_{i=1}^n w_i x_i, & \text{para } S1 \\ 0, & \text{para } S2 \\ -\delta \sum_{i=1}^n w_i x_i, & \text{para } S3 \end{cases} \quad (6.8)$$

onde  $\delta$  é um fator de amortecimento. Este fator deve ter um crescimento de seu valor absoluto para promover a desaceleração do veículo. Para tanto, uma das possíveis formulações é apresentada em seguida,

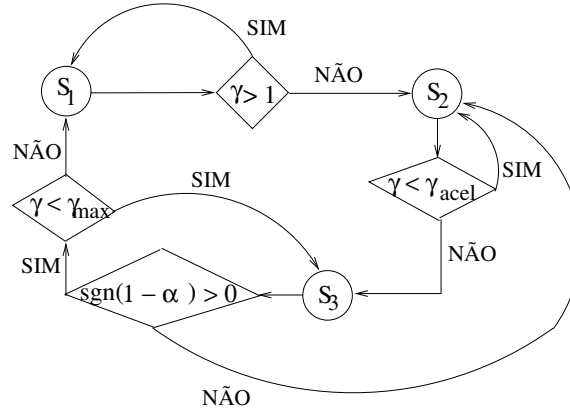


Figura 6.6: Máquina de estados finitos do veículo.

$$\delta = |1 - \check{w}^M|, \quad (6.9)$$

desde que,

$$M = \frac{k}{|\gamma_{max} - \gamma|}. \quad (6.10)$$

onde  $k \in I$  é um fator de escala. Note-se que a Eq. (6.9) contém o índice de regulação  $\check{w}$  que encontra-se na faixa  $[0,1]$ . Este índice é elevado a uma potência  $M$ . Esta potência cresce a medida que  $\gamma$  aproxima-se de seu valor máximo  $\gamma_{max}$ , i.e. quando o desempenho está em fase de recuperação.

Assim, enquanto  $M$  cresce, o valor de  $\check{w}^M$  decresce e conseqüentemente, o valor de  $\delta = |1 - \check{w}^M|$  aumenta.

Para gerar a desaceleração, este fator  $\delta$  multiplica uma entrada efetiva de sinal contrário  $(-\sum_{i=1}^n w_i x_i)$  e este resultado é somado à entrada efetiva da máquina funcional.

Esta subseção apresentou o uso de polarizadores da máquina funcional sob uma abordagem reativa. Esta abordagem permite que o veículo seja acionado apenas quando necessário.

A próxima subseção apresenta uma topologia que visa reforçar o mapeamento entre as entradas e a saída da Máquina Funcional Reativa. Nesta tese, esta topologia imprime uma maior amplitude de reação ao veículo, porém sem acarretar em descontinuidades indesejáveis nas ve-



locidades do SVMS.

### 6.3.5 A topologia de premonição

Outra proposta desta tese consiste no conceito de *Premonição* [dos Santos, 2003b, dos Santos et al., 2006g]. Trata-se de uma topologia *feedforward* que avança a informação da entrada efetiva da máquina funcional. Este avanço acontece através de uma conexão que torna o cálculo de todos os pesos ou parte deles, entre a camada oculta e a saída, equivalente à entrada efetiva da máquina.

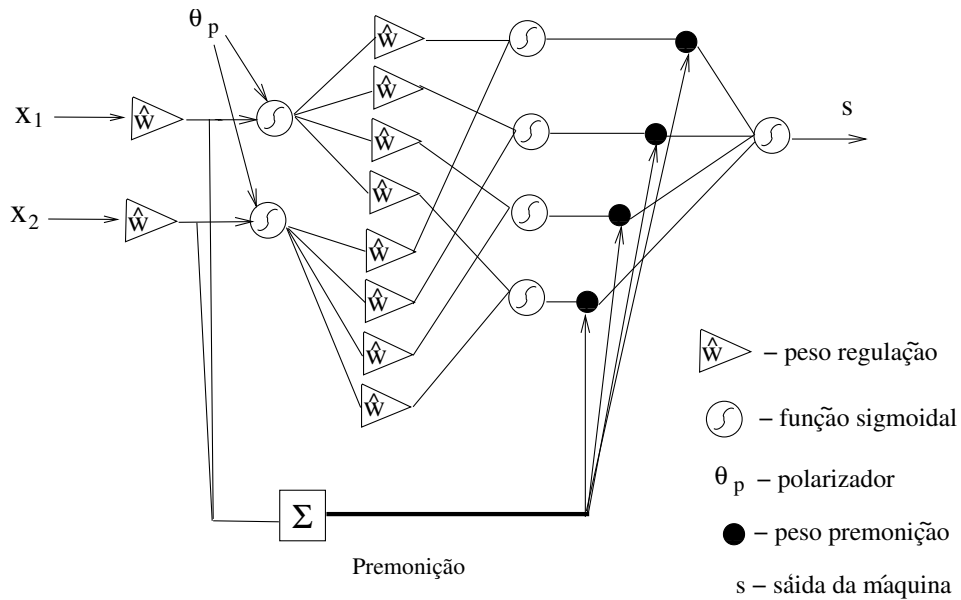


Figura 6.7: Máquina funcional reativa com premonição

Considerando a máquina funcional com premonição da Fig. 6.7, onde a saída  $s$  é determinada em termos dos  $n$  componentes do vetor de entrada  $x$ ,

$$s = f \left( \sum_{k=1}^n w_k x_k \left\{ f \left( \sum_{j=1}^L \left[ w_{kj} f \left( \sum_{k=1}^n w_{jk} x_k + \theta_{p_k} \right) \right] \right) \right\} \right), \quad (6.11)$$

sendo  $f(\cdot)$  as funções de ativação e  $L$  é o número de funções da camada intermediária. As primeiras interconexões são ponderadas por  $w_{jk}$ , as segundas interconexões são ponderadas por  $w_{kj}$  e finalmente, as terceiras interconexões são ponderadas pela premonição, i.e. pela entrada

efetiva  $\sum_{k=1}^n w_k x_k$  na saída  $s$ . Assim, apesar dos sucessivos amortecimentos proporcionados pelas funções  $f(\cdot)$ , o peso da conexão de Premonição permite uma ampliação da intensidade que uma função é capaz de excitar ou inibir outra função. Esta ampliação é proporcional à dimensão do vetor de entradas  $x$ . Em outras palavras, esta topologia prevê a influência de uma função sobre outra através da informação obtida na entrada efetiva. Portanto, a máquina funcional reage de forma a reforçar suavemente o mapeamento entre sua camada de entrada e sua camada de saída.

A próxima seção apresenta um conceito geométrico que visa complementar a atuação da máquina funcional sobre o SVMS através do aproveitamento de todos os graus de liberdade daquele sistema.

### 6.3.6 Distribuição da redundância

Esta seção apresenta um conceito que tem como objetivo explorar todos os graus de liberdade translacionais do veículo, incluindo os negligenciados. A justificativa consiste numa forma de contornar a limitação em que segmentos unidirecionais (ao longo de X ou de Y, por exemplo) a redundância do sistema não seria aproveitada. Esta limitação causa sobrecarga em apenas uma das coordenadas de deslocamento do veículo. Para tanto, propõe-se uma lei de chaveamento para um melhor aproveitamento do sistema redundante como se segue,

$$V_{pVx} = \begin{cases} \kappa\hat{\omega}V_{pEy} \text{ ou } \kappa\hat{\omega}V_{pEz} & \text{se } |\Psi_{Ex}| = 0 \\ V_{pEx}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6.12)$$

$$V_{pVy} = \begin{cases} \kappa\hat{\omega}V_{pEx} \text{ ou } \kappa\hat{\omega}V_{pEz} & \text{se } |\Psi_{Ey}| = 0 \\ V_{pEy}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6.13)$$

$$V_{pVz} = \begin{cases} \kappa\hat{\omega}V_{pEx} \text{ ou } \kappa\hat{\omega}V_{pEy} & \text{se } |\Psi_{Ez}| = 0 \\ V_{pEz}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6.14)$$

onde  $\kappa \in R$  é um ganho arbitrário que fornece a amplitude de utilização do grau de liberdade. Em síntese, as regras de chaveamento 6.12, 6.13 e 6.14 projetam os deslocamentos translacionais do efetuador final sobre os deslocamentos translacionais do veículo de forma a uniformizar seu movimento [dos Santos, 2003b, dos Santos et al., 2006g].

### 6.3.7 A Máquina Funcional Reativa aplicada ao SVMS

Finalmente, o modelo matemático de ativação do veículo é dada por,

$$\mathbf{s}_V = s\alpha\Lambda. \quad (6.15)$$

onde  $(s)$  é a saída da Máquina Funcional Reativa e  $\Lambda$  é definido como o vetor coluna de distribuição de redundância das atuações (veja Eq's. (6.12) a (6.14)), como exemplo no plano  $xy$ ,  $\Lambda = [V_{pVx}; V_{pVy}]$ . Além de evitar configurações singulares, a Eq. (6.15) explora toda a redundância do sistema.

### 6.3.8 Estudo de caso

Para ilustrar um caso de projeto da máquina funcional, esta seção apresenta uma seqüência construtiva de um caso simplificado.

A Fig. 6.8 exhibe uma função reativa, onde a entrada  $(x_1)$  é representada pelo agente reflexivo  $\alpha$ , o qual é ponderado pelo índice de regulação cinemática  $\hat{w}$ . Enquanto isso, o agente reativo  $\theta_p$  está de acordo com o ciclo de operação da Fig. 6.6. Apesar desta função provêr uma certa atenuação ao início do movimento, as velocidades do veículo podem apresentar valores elevados, pois este tipo de estrutura é o caso mais simples e não garante que movimentos excessivos ocorram quando o acionamento for solicitado. Associa-se este fato à função não ser suficiente para cumprir a propriedade de aproximação universal, onde é necessário uma combinação de um número maior de funções.

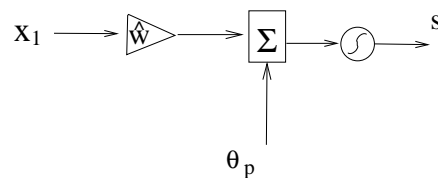


Figura 6.8: Função reativa.

Para tanto, as Figs. 6.9 e 6.10 exibem dois exemplos, embora ainda simplificados, de combinações lineares de funções. A Fig. 6.10 apresenta uma máquina onde as camadas de entrada,

intermediária e de saída contém apenas uma função de ativação. Esta máquina imprime à entrada  $x_1$  um sucessivo amortecimento que evita a manifestação de movimentos bruscos quando o acionamento do veículo é solicitado.

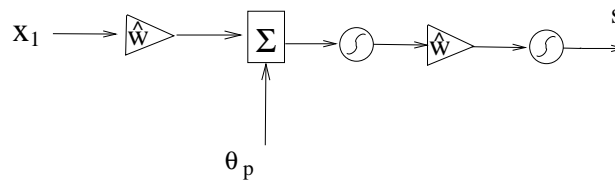


Figura 6.9: Máquina funcional reativa com duas camadas.

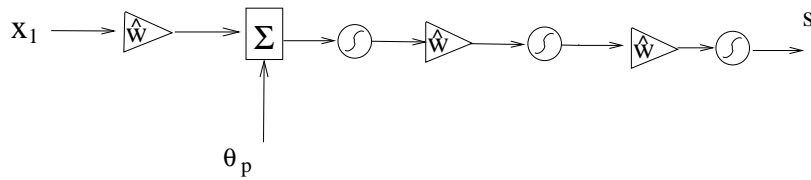


Figura 6.10: Máquina funcional reativa com três camadas.

Contudo, este sucessivo amortecimento pode causar uma perigosa aproximação do desempenho  $\gamma$  ao seu valor de tolerância  $\gamma_{tol}$ . Para contornar esta limitação, um número maior de funções pode ser adicionado às camadas que constituem a máquina funcional. Outra alternativa é ilustrada na Fig. 6.11, onde foi acrescentada a conexão de premonição que visa reforçar a reação do veículo, evitando que o desempenho alcance valores muito próximos de  $\gamma_{tol}$ .

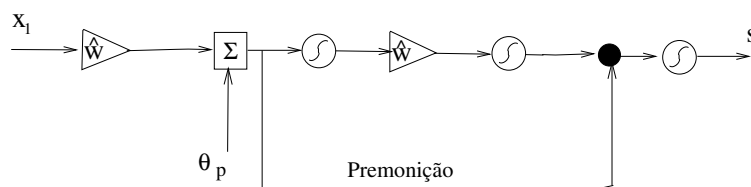


Figura 6.11: Máquina funcional reativa com premonição.

O perfil do desempenho ainda pode ser aperfeiçoado, ou seja afastar-se mais de  $\gamma_{tol}$ , se outras entradas (informações) forem manipuladas pela máquina. A Fig. 6.12 expõe outras possíveis

entradas que podem ser extraídas da superfície de polarização, como tratado na seção 6.4.2.

Neste caso,  $x_2 = |\alpha - \gamma_{tol}|$  e  $x_3 = |\gamma_{max} - \gamma|$ .

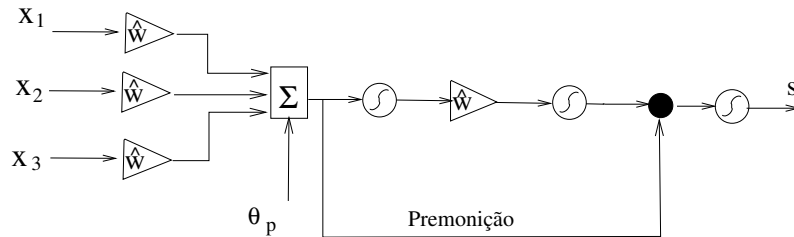


Figura 6.12: Máquina funcional reativa com premonição e três entradas.

Esta máquina tem apenas uma função na camada de entrada, uma função na camada oculta e uma função na saída, onde as conexões são ponderadas por regulações cinemáticas  $\hat{w}$  e pela premonição  $\hat{w}(x_1 + x_2 + x_3)$ .

## 6.4 Conclusões

Este capítulo apresentou uma proposta de ativação do SVMS que utiliza uma Máquina Funcional Reativa, onde ocorre uma síntese de informações. Estas informações baseiam-se em conceitos de sistemas elétricos de potência.

Foi desenvolvida a modelagem de uma superfície responsável por descrever o comportamento desejado do veículo e fornecer informações que visam garantir um melhor perfil do desempenho. A manipulação destas informações é associada à uma máquina de estados reativa incorporada ao polarizador da máquina funcional.

Adicionalmente, uma nova topologia denominada de Premonição estabelece um reforço no mapeamento entre as entradas e a saída da Máquina Funcional Reativa.

Foi exposto um exemplo de projeto justificando cada uma de suas etapas a partir da teoria anteriormente apresentada.

## Capítulo 7

# Movimento Coordenado dos Sistemas Veículo-Manipulador Submarinos usando Sistemas Nebulosos Híbridos

*Neste capítulo apresenta-se a abordagem nebulosa híbrida como opção de coordenação de movimento do SVMS. Esta abordagem manipula variáveis contínuas e discretas de forma a estabelecer um comportamento ao veículo equivalente ao de uma histerese.*

### 7.1 Introdução

Dois dos principais aspectos da imperfeição da informação são a imprecisão e a incerteza. Estas duas características são intrinsecamente ligadas e opostas entre si. As teorias mais conhecidas para tratar da imprecisão e da incerteza são respectivamente a teoria dos conjuntos e a teoria de probabilidades. Estas teorias, embora muito úteis, nem sempre conseguem captar a riqueza da informação fornecida por seres humanos. A teoria dos conjuntos não é capaz de tratar o aspecto vago da informação e a teoria de probabilidades é mais adaptada para tratar informações frequentistas do que aquelas fornecidas pelos seres humanos [Sandri and Correa, 1999].

A teoria dos conjuntos nebulosos foi desenvolvida a partir de 1965 por Lofti Zadeh, para

tratar do aspecto vago da informação [Zadeh, 1965]. Esta teoria por ser menos restritiva, pode ser considerada mais adequada para o tratamento de informações fornecidas por seres humanos que a de probabilidades.

A teoria dos conjuntos nebulosos, quando utilizada em um contexto lógico, como o de sistemas baseados em conhecimento, é conhecida como lógica nebulosa, lógica difusa ou lógica *fuzzy*. Atualmente, uma das áreas mais atuantes de aplicação da lógica nebulosa é a de sistemas de controle.

A lógica nebulosa pode ser usada para formalizar requisitos complexos de sistemas de controle, pois sua representação do conhecimento e inferência de novos conhecimentos é similar à maneira utilizada pelos seres humanos para expressarem o conhecimento e o raciocínio [Zadeh, 1973]. Os sistemas que utilizam esta lógica denominam-se sistemas nebulosos (SNs).

Os SNs são sistemas especialistas de controle que interpolam de forma suave entre regras bem estabelecidas, pois de forma similar às redes neurais, os SNs são aproximadores universais de uma dada função com precisão arbitrária [Wang, 1992, Passino and Yurkovich, 1998, de Silva, 1995]. Esta característica é atrativa para o tipo de acionamento que o veículo deve desenvolver no sentido de evitar descontinuidades nas velocidades do SVMS.

Nas pesquisas desenvolvidas em robótica submarina, as aplicações de SNs ganham relevância devido às características das missões e dos tipos de sistemas robóticos utilizados neste campo de conhecimento. Esta relevância é justificada quando, no caso deste trabalho, um SVMS autônomo necessita coordenar os movimentos entre o veículo e o manipulador, garantindo simultaneamente: economia energética do sistema de atuação, além de evitar posturas singulares e descontinuidades nas velocidades do manipulador.

Tais compromissos na solução da redundância do SVMS precisam que robustez e adaptabilidade sejam essenciais para garantir o sucesso da missão. Para este fim, SNs são particularmente bem sucedidos neste tipo de implementação devido à sua capacidade de raciocínio diante de incertezas.

Desta forma, o SVMS adquire conhecimento para garantir um grau de independência operacional, i.e. autonomia. Neste sentido, este capítulo apresenta estratégias para solução da redundância do SVMS através de uma imposição conveniente das velocidades do veículo. Esta

conveniência é garantida pela aplicação do conhecimento humano incorporado aos SNs.

Contudo, devido ao tipo de comportamento projetado para o veículo exigir uma memória, estes SNs têm a característica particular de manipularem variáveis contínuas e discretas. Assim, estes SNs recebem neste trabalho a denominação de sistemas nebulosos híbridos (SNHs).

A próxima seção faz uma breve revisão de conceitos de SNs.

## 7.2 Fundamentos teóricos

### 7.2.1 Conjuntos nebulosos

Formalmente, um conjunto nebuloso  $A$  do universo de discurso  $\Omega$  é definido por uma função de pertinência  $\mu_A : \Omega \rightarrow \{0, 1\}$ . Essa função associa a cada elemento  $x$  de  $\Omega$  o grau  $\mu_A(x)$ , com o qual  $x$  pertence a  $A$  [Zadeh, 1965]. A função de pertinência  $\mu_A(x)$  indica o grau de compatibilidade entre  $x$  e o conceito expresso por  $A$ .

- $\mu_A(x) = 1$  indica que  $x$  é completamente compatível com  $A$ .
- $\mu_A(x) = 0$  indica que  $x$  é completamente incompatível com  $A$ .
- $0 < \mu_A(x) < 1$  indica que  $x$  é parcialmente compatível com  $A$ , com grau  $\mu_A(x)$ .

Um conjunto  $A$  da teoria dos conjuntos clássica pode ser visto como um conjunto nebuloso específico, denominado de "crisp", para o qual  $\mu_A : \Omega \rightarrow \{0, 1\}$ , ou seja, a pertinência é do tipo "tudo ou nada", "sim ou não" e não gradual como para os conjuntos nebulosos [Sandri and Correa, 1999]. Assim, os conjuntos nebulosos são caracterizados por funções de pertinência que assumem valores contínuos entre o *falso*(0) e *verdadeiro*(1).

Esta característica de evolução gradual é relevante para a solução de redundância do SVMS, desde que o evitamento de descontinuidades no acionamento do veículo é um dos objetivos deste trabalho.



### 7.2.2 Estrutura geral dos SNs

Os SNs baseados em regras são, usualmente, compostos por quatro blocos principais de acordo com a Fig. 7.1 [Passino and Yurkovich, 1998, Barreto, 2001]:

- interface de nebulização: mapeia números abruptos de entrada (*crisp*) em conjuntos nebulosos. Isto é necessário para ativar regras que estão em termos de variáveis linguísticas, as quais possuem conjuntos nebulosos associados a elas ;
- base de conhecimento: possui as regras que podem ser fornecidas pelo especialista ou ser extraída de dados numéricos. Em ambos casos as regras de inferência são expressas como declarações do tipo "SE <premissa> ENTÃO <conseqüente>". Neste trabalho, este conhecimento é extraído de uma função que descreve o comportamento desejado do veículo, o qual é apresentado com mais detalhes na seção 7.4;
- mecanismo de inferência: manipula o caminho no qual as regras são combinadas.;
- interface de desnebulização: transforma os resultados nebulosos de inferência em saídas de dados *crisp*.

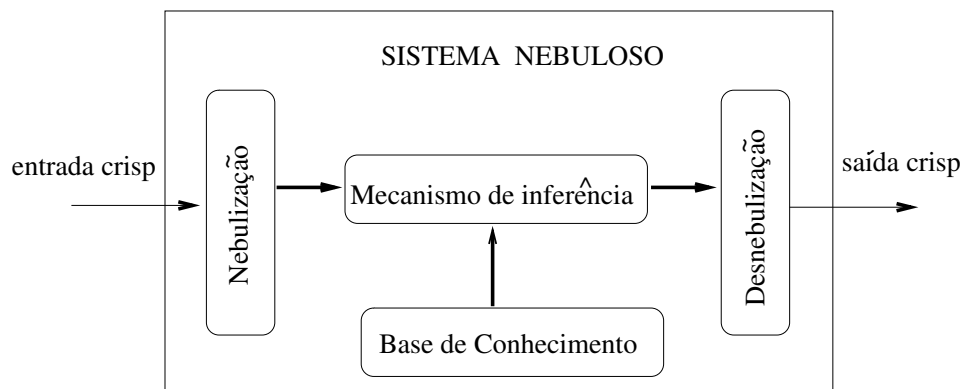


Figura 7.1: Estrutura clássica de um sistema nebuloso

### 7.2.3 Raciocínio nebuloso

No raciocínio nebuloso a decisão é baseada na informação de entrada e no conhecimento armazenado na base de conhecimento. Esta base de conhecimento possui as regras que são baseadas nas proposições nebulosas, nas premissas e conseqüentes das mesmas. O modelo de raciocínio nebuloso por sua vez, é classificado com base na forma dos conseqüentes das regras [Passino and Yurkovich, 1998]. Dois dos principais modelos são os de Mamdani e de Takagi-Sugeno. Este último é brevemente revisado a seguir.

#### 7.2.3.1 Modelo de Takagi-Sugeno

O modelo nebuloso de Takagi-Sugeno (TS) [Takagi and Sugeno, 1985] representa uma relação linear entre entrada e saída do sistema. Matematicamente, este modelo é da seguinte forma:

Regra i: SE  $x_1$  é  $A_{i1}$  ... e  $x_n$  é  $A_{in}$ ,

ENTÃO  $y' = f_i(x_1, \dots, x_n)$ .

onde  $A_{ij}$  são conjuntos nebulosos e  $f_i(x_1, \dots, x_n)$  é uma função polinomial, a qual pode ser de primeira ordem ou de ordem zero, i.e. funções lineares ou constantes.

Este sistema funcional nebuloso é desnebulizado em apenas uma ação de controle  $y$  denominada valor *crisp*. Este valor é fornecido pela seguinte média ponderada,

$$y = \frac{\sum_{i=1}^R y'_i \mu_i}{\sum_{i=1}^R \mu_i}, \quad (7.1)$$

onde  $R$  é o número de regras SE-ENTÃO;

$$\mu_i = \prod_{j=1}^n A_{ij}(x_j), \quad (7.2)$$

onde  $A_{ij}(x_j)$  é o grau de pertinência de  $x_j$  em  $A_{ij}$ .

O modelo TS não necessita de uma interface de "desnebulização", pois já obtém-se diretamente os valores precisos para as entradas do processo controlado [Sandri and Correa, 1999].

Esta facilidade motivou o uso deste modelo como a representação do estado do veículo e é adotada nas implementações computacionais das arquiteturas apresentadas neste capítulo.

A próxima seção apresenta o conceito de máquinas seqüenciais que fornecem as variáveis discretas a serem manipuladas pelo modelo de TS.

### 7.3 A máquina seqüencial de Moore

Uma máquina que aceita entradas de comando e traduz as mesmas em saídas é denominada de máquina seqüencial ou transdutor [Carrol and Long, 1989]. Estas máquinas são de especial aplicação no contexto de sistemas que manipulam variáveis contínuas e discretas, i.e. sistemas híbridos. Isto é justificado pela capacidade dessas máquinas representarem comportamentos de entrada e saída (típica dos modelos de engenharia). Uma das principais máquinas seqüenciais é a de Moore e sua definição é revisada a seguir.

**Definição:** Uma máquina seqüencial de Moore (MSM) é uma coleção  $\langle \Sigma, \Gamma, S, s_0, \delta, \omega \rangle$ , onde:

$\Sigma$  : é o alfabeto de entrada.

$\Gamma$  : é o alfabeto de saída.

$S$  : é o conjunto de estados.

$s_0$  : é o estado inicial,  $s_0 \in S$ .

$\delta : S \times \Sigma \rightarrow S$  é a função de transição.

$\omega : S \rightarrow \Gamma$  denota a função de saída.

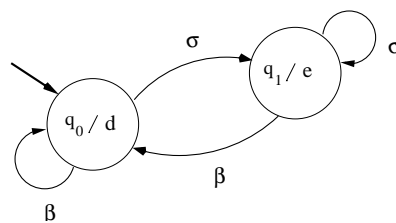


Figura 7.2: Máquina seqüencial de Moore

Como destacado na Fig. 7.2, a representação gráfica de uma MSM é um grafo direcionado, onde o conjunto de nós  $S = \{q_0, q_1\}$  é o conjunto de estados. Cada um destes estados é seguido

por um alfabeto de saída  $\Gamma = \{d, e\}$ , separado por uma barra /. Os arcos com legendas  $\Sigma = \{\sigma, \beta\}$  fornecem uma representação gráfica das transições entre os estados. O estado inicial  $s_0$  é indicado por uma seta.

A MSM é adotada neste trabalho como a parte discreta dos sistemas nebulosos híbridos, a qual é responsável pela transição entre os estados de movimento e de repouso do veículo. Os detalhes de implementação da MSM nos sistemas nebulosos são apresentados na próxima seção.

## 7.4 Sistemas nebulosos híbridos

Esta seção apresenta as arquiteturas de controle nebulosas utilizadas para a solução da redundância dos SVMS. Estas arquiteturas manipulam informações contínuas e discretas e por isso são denominadas de sistemas nebulosos híbridos (SNHs). Entretanto, uma prévia apresentação dos requisitos que representam o comportamento desejado do veículo faz-se necessária.

### 7.4.1 Representação do conhecimento através de uma Histerese

De forma equivalente a proposta de acionamento do veículo apresentada pelo agente reativo do capítulo 6, considera-se que o veículo esteja em repouso no início da tarefa e permaneça desta forma enquanto o índice de desempenho  $\gamma$  não alcançar a vizinhança de singularidade, i.e. seu valor continua acima do valor unitário. Quando  $\gamma$  alcançar valores inferiores a unidade  $\gamma_{tol} < \gamma < 1$  ( $\gamma_{tol}$  tolerância de desempenho), a velocidade do veículo torna-se diferente de zero e assim se mantém enquanto ( $\gamma < \gamma_{max}$ ) ( $\gamma_{max}$  desempenho máximo). Quando este índice retoma valores superiores à unidade, o veículo inicia uma desaceleração até atingir novamente o estado repouso. Ele permanece neste estado enquanto  $\gamma$  estiver afastado da vizinhança de singularidade. De outra forma, todo o ciclo de movimento se repete.

Este tipo de comportamento pode ser descrito por uma função de natureza não-linear, onde o mapeamento entre as entradas e as saídas possui uma "memória" [Khalil, 2002]; i.e. a saída (velocidade do veículo), em qualquer instante do tempo depende de todo histórico da entrada ( $\gamma$ ). Esta função denomina-se de histerese e a Fig. 7.3 exibe seu perfil.

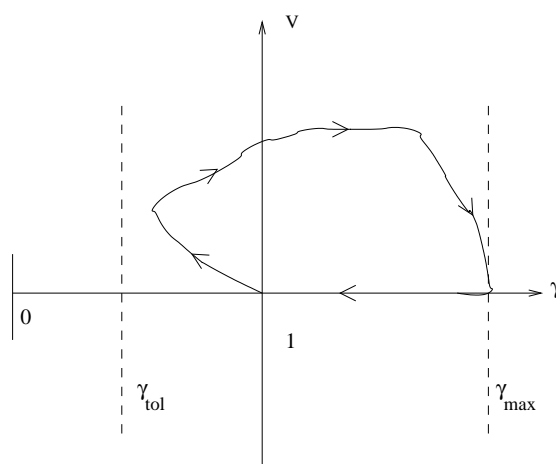


Figura 7.3: Comportamento do veículo descrito por uma histerese.

Esta memória naturalmente associada à histerese, exhibe uma seqüência de estados de repouso e de movimento, com eventos que causam a transição entre os estados.

Com estas constatações, a transição entre os estados pode ser representada por uma forma apropriada de formalismo denominado de autômato [Cassandras and Lafortune, 1999], o qual é intrínseco à histerese [Shaft and Schumacher, 2000].

Este autômato está de acordo com a Fig. 7.2, onde  $q_0$  é o estado de repouso e  $q_1$  é o estado de movimento. O alfabeto de saída  $\Gamma = \{d, e\}$  representa respectivamente as condições de desabilitado (do inglês *disable*) e habilitado (do inglês *enable*). Enquanto isso,  $\beta$  e  $\sigma$  representam os eventos  $(\gamma > 1)$  e  $(\gamma < \gamma_{max})$ . De acordo com a descrição, considera-se o veículo inicialmente em estado de repouso ( $s_0 = q_0$ ).

De acordo com Mendel e Wang [Mendel, 1995, Wang, 1992], é possível contruir um sistema nebuloso a partir de uma dada função.

Neste sentido, as próximas subseções apresentam três diferentes arquiteturas de implementação da função histerese do veículo, utilizando recursos de SNs.

Contudo, devido a uma de suas entradas ser discreta, representada pela saída da máquina de Moore  $\omega$ , estes sistemas denominam-se de sistemas nebulosos híbridos (SNHs). Neste trabalho estas arquiteturas são classificadas de supervisora, compacta e projetiva, respectivamente.

### 7.4.2 Arquitetura supervisora

O controle supervisório corresponde a uma arquitetura comumente usada em sistemas de controle distribuído e é particularmente relevante quando várias funções de controle do sistema podem ser convenientemente distribuídas em diferentes níveis de hierarquia [de Silva, 1995, Passino and Yurkovich, 1998].

Este trabalho apresenta uma proposta simples de arquitetura supervisória para a implementação do comportamento histerese do veículo. Para tanto, ocorre uma distribuição de funções, onde um controlador nebuloso, hierarquicamente superior, habilita ou desabilita a aplicação de outro controlador nebuloso de ação contínua. Esta ação supervisora é baseada no monitoramento do índice de desempenho  $\gamma$  [dos Santos et al., 2006a].

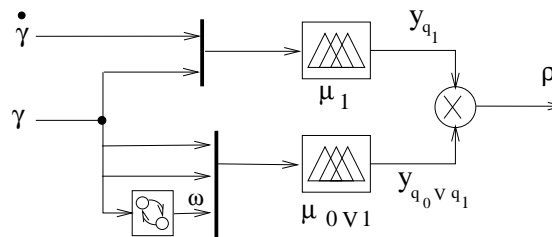


Figura 7.4: Arquitetura supervisória

Neste trabalho, o controlador nebuloso de ação contínua ( $\mu_1$ ) recebe a denominação de estado de movimento. Por outro lado, de acordo com a bibliografia, denomina-se o controlador hierarquicamente superior de supervisor ( $\mu_{0V1}$ ). Assim, o movimento contínuo do veículo é fornecido pela saída *crisp* resultante das funções de pertinência do estado de movimento  $y_{q_1}$ , enquanto a transição entre os estados de repouso e movimento é fornecida pela saída do supervisor  $y_{q_0 \vee q_1}$  (veja diagrama de simulação da Fig. 7.4).

#### 7.4.2.1 Estado de movimento ( $q_1$ )

O significado físico do estado de movimento ( $q_1$ ) leva em consideração a variação do índice de desempenho sobre o universo de discurso  $[0, \gamma_{max}]$ . Este universo obtém seus valores das seguintes variáveis lingüísticas: BG representa baixo grande, BP representa baixo pequeno, AP

denota alto pequeno, AG representa alto grande e MG é muito grande, usadas respectivamente para descrever as características da variável  $\gamma$ , como ilustrado na Fig. 7.5. Do mesmo modo, a taxa de variação do índice  $\dot{\gamma}$  é denominada como: P representando positiva, Z representando zero and N representando negativa (veja Fig. 7.6).

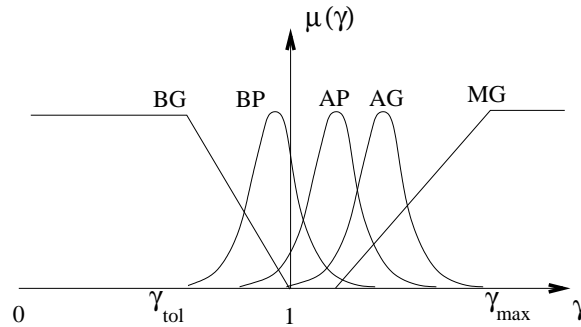


Figura 7.5: Índice de desempenho  $\gamma$

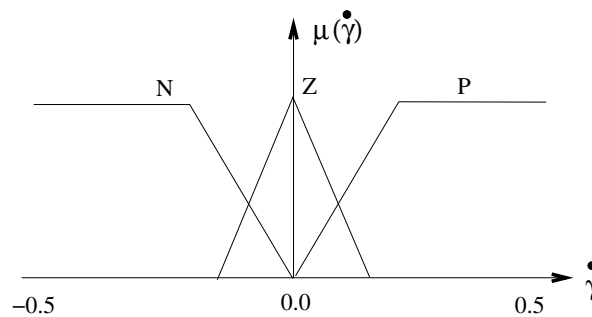


Figura 7.6: Variação do índice de desempenho  $\dot{\gamma}$

De acordo com o modelo de TS, a saída do controle é representada na Tabela 7.1 por constantes, onde: CAP representa um controle alto positivo, CPP representa um controle pequeno positivo e Z é zero, respectivamente.

A descrição matemática da saída é representada como segue,

$$y_{q1} = \frac{\sum_{i=1}^R y'_{q1_i} \mu_i}{\sum_{i=1}^R \mu_i}, \quad (7.3)$$

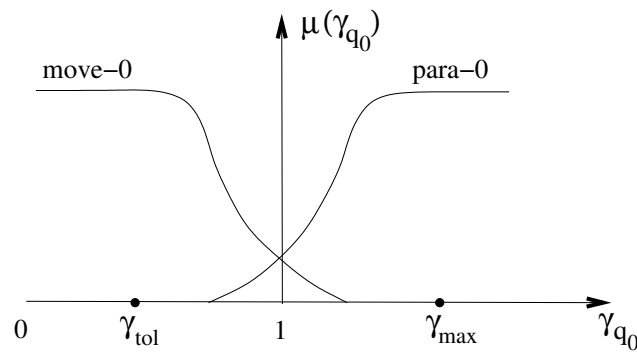
Tabela 7.1: Base das regras do estado de movimento.

$\dot{\gamma} \backslash \gamma$	BG	BP	AP	AG	MG
P	CAP	CPP	CPP	CPP	Z
Z	CAP	CAP	CPP	CPP	Z
N	CAP	CAP	CAP	CPP	Z

onde  $y'_{q_{1_i}}$  são constantes e  $\mu_i$  são definidas como na seção 7.2. A Eq. (7.3) fornece o movimento contínuo do SVMS. Entretanto, a implementação do comportamento histerese requer que o veículo movimente-se apenas quando necessário, i.e. precisa-se da restrição que gere a condição de repouso. Para tanto, a próxima subseção apresenta o controle responsável pela complementação desta abordagem nebulosa.

#### 7.4.2.2 Supervisor nebuloso ( $q_0 \vee q_{1_i}$ )

A estrutura do controlador supervisor propõe distribuir a interpretação do índice de desempenho  $\gamma$  em duas situações: antes do movimento iniciar ( $\gamma_{q_0}$ ) e após o início do movimento ( $\gamma_{q_1}$ ). As Figs. 7.7 e 7.8 expõem estas situações, onde as funções de pertinência são dispostas de acordo com a transição para movimento ou para repouso.


Figura 7.7:  $\gamma$  antes do início do movimento

Por outro lado, a suavização da entrada discreta, responsável pela memorização, tem suas funções de pertinência representadas na Fig. 7.9.



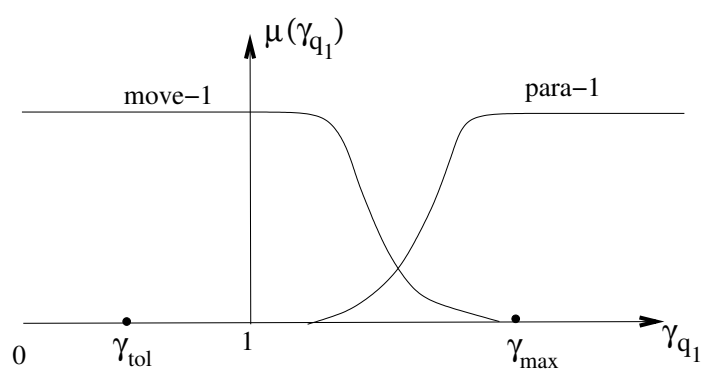


Figura 7.8:  $\gamma$  após o início do movimento

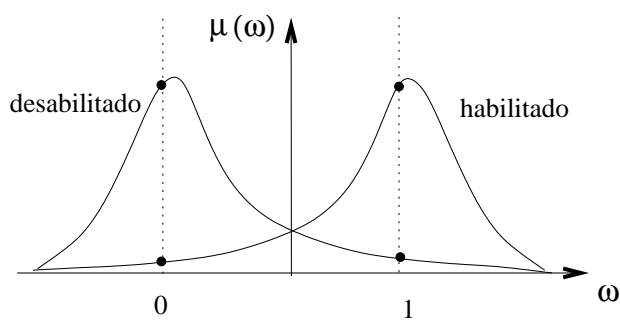


Figura 7.9: Memória

A combinação destas funções compõe o ciclo de movimento da histerese. A Tabela 7.2 provê a base de regras deste ciclo.

Tabela 7.2: Base das regras de transição.

$\backslash \gamma_{q_0}$	repouso-0		movimento-0	
	$\omega$		$\omega$	
$\gamma_{q_1} \backslash$	desabilitado	habilitado	desabilitado	habilitado
repouso-1	repouso	movimento	$\emptyset$	$\emptyset$
movimento-1	repouso	movimento	$\emptyset$	movimento

O significado físico da saída da Tabela 7.2 informa que, na célula (1, 2) por exemplo: se a memória  $\omega$  está *habilitada*, e o desempenho antes do movimento ( $\gamma_{q_0}$ ) é *repouso-0* e o desempenho após o movimento ( $\gamma_{q_1}$ ) é *repouso-1* então o veículo se movimenta.

A desnebulização das regras é fornecida pela seguinte equação,

$$y_{q_0 \vee q_1} = \frac{\sum_{i=1}^R y'_{q_0 \vee q_1 i} \mu_i}{\sum_{i=1}^R \mu_i}, \quad (7.4)$$

onde  $y'_{q_0 \vee q_1 i}$  são constantes e  $\mu_i$  são definidas de acordo com a seção 7.2. A Eq. (7.4) provê a transição que habilita ou desabilita o movimento do veículo de acordo com a supervisão de  $\gamma$ .

A combinação das Eqs. (7.3) e (7.4) gera a saída do algoritmo:

$$\rho = y_{q_1} y_{q_0 \vee q_1}. \quad (7.5)$$

A próxima seção apresenta a arquitetura que gera a ação de controle como saída de um único controlador nebuloso.

### 7.4.3 Arquitetura compacta

Diferentemente da seção anterior, a arquitetura compacta propõe um SNHs que utiliza apenas um controlador nebuloso para implementação do comportamento histerese do veículo, como destacada na Fig. 7.10 [dos Santos et al., 2006b, dos Santos et al., 2006c].

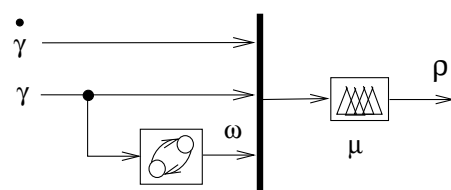


Figura 7.10: Arquitetura compacta

As entradas  $\gamma$  e  $\dot{\gamma}$  são o desempenho e sua taxa de variação, respectivamente. Como na seção anterior, a terceira entrada do SN é fornecida pela saída discreta da máquina sequencial de Moore. A Fig. 7.11 exibe a nebulização que suaviza o acionamento discreto. Observa-se que este acionamento é limitado por um valor crisp máximo ( $\omega_{max}$ ). De outra forma, o veículo encontra-se em repouso.

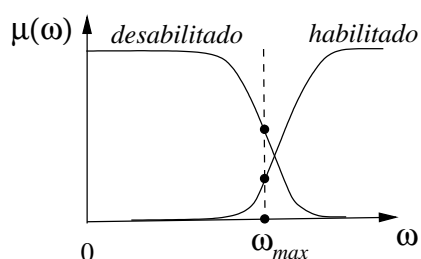


Figura 7.11: Memória

A combinação destas funções provê o ciclo da histerese de acordo com a Tabela 7.3.

Tabela 7.3: Base de regras do ciclo da histerese

	$\omega$							
	habilitado					desabilitado		
$\dot{\gamma} \setminus \gamma$	BG	BP	AP	AG	MG	AP	AG	MG
P	CAP	CPP	CPP	CPP	Z	Z	Z	Z
Z	CAP	CMP	CPP	CPP	Z	Z	Z	Z
N	CAP	CMP	CMP	CPP	Z	Z	Z	Z

As saídas da Tabela 7.3 são constantes representadas por: CAP representa o controle alto

positivo, CMP representa o controle médio positivo, CPP representa o controle pequeno positivo e Z é zero, respectivamente.

Nesta Tabela, o significado físico informa, por exemplo, que na célula (3, 2): se a memória  $\omega$  é *habilitada*, e o desempenho  $\gamma$  é BP (*baixo pequeno*) e a derivada do desempenho  $\dot{\gamma}$  é N (*negativa*) então o veículo move-se com CMP (*controle médio positivo*).

A representação da saída matemática é fornecida como segue,

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^R \rho'_i \mu_i}{\sum_{i=1}^R \mu_i}, \quad (7.6)$$

onde  $\rho'_i$  são constantes e  $\mu_i$  são definidas como na seção 7.2. A Eq. (7.6) é a saída do algoritmo que provê o movimento do veículo de acordo com o ciclo da histerese descrito anteriormente.

#### 7.4.4 Controle do SVMS

A formulação do acionamento do veículo é definida por

$$\$_V = \rho \Lambda, \quad (7.7)$$

sendo a saída nebulosa  $\rho$ , tanto da arquitetura supervisória, como da arquitetura compacta, aplicada ao vetor de projeção geométrica  $\Lambda$ .

A próxima seção apresenta a terceira arquitetura de SNHs que gera diretamente a velocidade do veículo. Isto ocorre através de uma síntese de informações num único controlador que permite uniformidade e coordenação do movimento do veículo.

#### 7.4.5 Arquitetura projetiva

Uma das propriedades dos SNs é sua capacidade de processamento de regras em paralelo [Kosko, 1992]. Esta propriedade de paralelismo é explorada de forma mais enfática nesta seção.

Até aqui, as arquiteturas anteriores desenvolveram um controle  $\rho$ , interpretado como uma parcela da velocidade do efetuator que movimenta o veículo do SVMS.

Nesta terceira e última arquitetura de SNHs, denominada de projetiva, implementa-se diretamente a velocidade do veículo através do processamento paralelo de um número maior de informações num único controlador (veja Fig. 7.12) [dos Santos et al., 2006d].

Sua denominação é justificada pela capacidade de incorporar a função de distribuição geométrica dos acionamentos. Ou seja, a arquitetura projetiva possui uma heurística que agrega a função do vetor de projeção  $\Lambda$ , utilizada para complementar as arquiteturas supervisória e compacta.

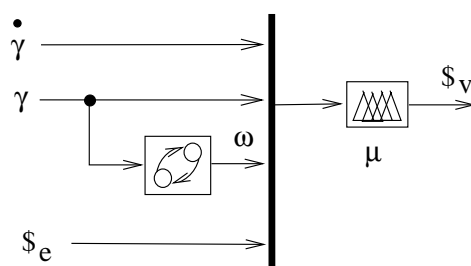


Figura 7.12: Arquitetura projetiva

Na Fig. 7.12, o vetor de velocidades do veículo  $\dot{\gamma}$  usa como entradas:  $\dot{\gamma}$ ,  $\gamma$ ,  $\omega$  e  $\$_e$  (vetor de velocidades do efetuador). Destaca-se que a entrada  $\omega$  é equivalente à utilizada na arquitetura compacta. Enquanto isso, o vetor de velocidades do efetuador  $\$_e$  permite distribuir os graus de liberdade, projetando os movimentos de certas coordenadas sobre outras coordenadas ocasionalmente inutilizadas. Os detalhes desta distribuição e a concepção de  $\dot{\gamma}$  são expostos a seguir.

#### 7.4.5.1 Distribuição da redundância

O modelo cinemático do SVMS usa juntas prismáticas para representar a posição do veículo e em virtude disso, alguns graus de liberdade podem se tornar inutilizados durante a execução de segmentos unidirecionais de uma trajetória. Esta limitação foi contornada pela arquitetura compacta, através do vetor de projeção geométrica  $\Lambda$ .

Nesta seção, propõe-se que a representação heurística cause efeito semelhante ao vetor  $\Lambda$ . Para este fim, informações adicionais se fazem necessárias e são obtidas pelo vetor de veloci-

dades do efetuador final  $[\$e]$ . Este vetor de velocidades é uma das entradas do SNH, onde as componentes ativas  $\$e'_i$  e inativas  $\$e_i$  da velocidade do efetuador são combinadas. Nesta combinação, as velocidades inativas passam a ser não nulas, porém, limitadas por valores menores que os valores das velocidades ativas.

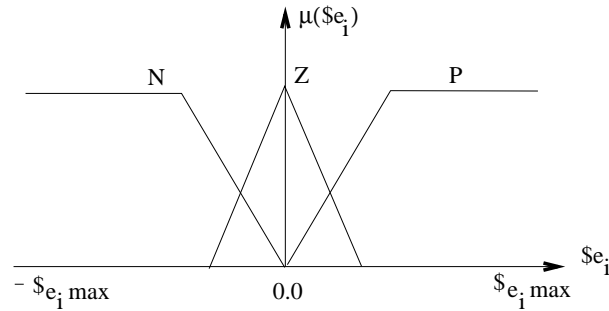


Figura 7.13: Componente da velocidade do efetuador

Neste trabalho, as funções de pertinência das i-componentes da velocidade do efetuador são consideradas equivalentes e exibidas na Fig. 7.13.

#### 7.4.5.2 Representação projetiva do conhecimento

A composição das entradas do diagrama da Fig. 7.12 promove o ciclo de histerese para cada coordenada do veículo de acordo com a base de regras da Tabela 7.4. Com o objetivo de facilitar sua compreensão, a saída desta Tabela é organizada em sub-Tabelas (Tabela-7.5, Tabela-7.6, Tabela-7.7 e Tabela-7.8) as quais são mostradas em detalhes a seguir.

De acordo com o modelo TS, a saída destas sub-tabelas são constantes representadas por:  $VAP$  e  $VAN$  representam as velocidades altas positiva e negativa,  $VMP$  e  $VMN$  representam as velocidades médias positiva e negativa,  $VPP$  e  $VPN$  representam as velocidades pequenas positivas e negativas e  $Z$  é zero, respectivamente.

A Tabela-7.5 representa a base de regras das velocidades negativas do veículo, enquanto a Tabela-7.6 exhibe a base de regras para a distribuição da redundância. Esta última possui uma disposição estratégica entre as velocidades inativas  $\$e_i$  e ativas  $\$e'_i$  durante as condições de baixo

Tabela 7.4: Base de regras projetiva

	$\omega$			
	habilitado			desabilitado
	$\$_{e_i}$			
	N	Z	P	
	$\$'_{e_i}$			
	não importa	N   P	não importa	
$\dot{\gamma} \backslash \gamma$	BG ... MG	BG ... MG   BG ... MG	BG ... MG	BG ... MG
P				
Z	Tabela 7.5	Tabela 7.6	Tabela 7.7	Tabela 7.8
N				

aproveitamento da redundância do SVMS, i.e. quando  $\$_{e_i}$  é zero em algum segmento do espaço de trabalho.

A Tabela-7.7 representa a base de regras das velocidades positivas do veículo, enquanto o fechamento do ciclo de histerese ocorre com a Tabela-7.8, que exibe a base de regras do estado de repouso do veículo.

Tabela 7.5: Base de regras para:  $\omega$ =habilitado e  $\$_{e_i}$ =N

$\dot{\gamma} \backslash \gamma$	BG	BP	AP	AG	MG
P	VAN	VPN	VPN	VPN	Z
Z	VAN	VMN	VPN	VPN	Z
N	VAN	VMN	VMN	VPN	Z

Tabela 7.6: Base de regras para:  $\omega$ =habilitado,  $\$_{e_i}$ =Z e  $\$'_{e_i}$ =N/P

$\dot{\gamma} \backslash \gamma$	BG ... AG	MG	BG ... AG	MG
P	VPN	Z	VPP	Z
Z	VPN	Z	VPP	Z
N	VPN	Z	VPP	Z

Tabela 7.7: Base de regras para:  $\omega$ =habilitado,  $\$_{e_i}$ =P

$\dot{\gamma} \backslash \gamma$	BG	BP	AP	AG	MG
P	VAP	VPP	VPP	VPP	Z
Z	VAP	VMP	VPP	VPP	Z
N	VAP	VMP	VMP	VPP	Z

Tabela 7.8: Base de regras para:  $\omega$ =desabilitado

$\dot{\gamma} \backslash \gamma$	AP	AG	MG
P	Z		
Z	Z		
N	Z		

O significado físico da saída da Tabela 7.6 informa, por exemplo: se a memória  $\omega$  está *habilitada*, e o desempenho  $\gamma$  está entre BG (*baixo grande*) e AG (*alto grande*) e em todo intervalo da derivada do índice  $\dot{\gamma}$  e se a velocidade ativa do efetuador  $\$'_{e_i}$  é N *negativa* então o veículo se move com *VPN (velocidade pequena negativa)*.

A descrição matemática da saída do  $j$ -ésimo componente translacional é representada de acordo com a seguinte equação,

$$\$_{pV_j} = \frac{\sum_{i=1}^R \$_{V_i}' \mu_i}{\sum_{i=1}^R \mu_i}, \quad (7.8)$$

onde  $\$_{V_i}'$  são constantes e  $\mu_i$  são definidas de acordo com a seção 7.2. A Eq. 7.8 gera a velocidade translacional do veículo como a histerese descrita anteriormente.

## 7.5 Conclusões

Após uma breve revisão dos fundamentos dos sistemas nebulosos, foi justificada a concepção dos sistemas nebulosos híbridos e sua aplicação na solução da redundância do SVMS.

Para solucionar a redundância do SVMS, três arquiteturas de SNHs foram apresentadas de forma sistemática. Estas arquiteturas foram denominadas: supervisória, compacta e projetiva.



A arquitetura supervisória usa dois controladores numa disposição de funções hierárquicas.

Por outro lado, a arquitetura compacta efetua o mesmo processamento, usando apenas um controlador nebuloso.

Assim como abordado no tratamento neural, propõe-se que as arquiteturas supervisória e compacta utilizem o vetor  $\Lambda$  como forma de projetar o movimento do efetuador sobre o veículo, no sentido de uniformizar o movimento do SVMS em trajetórias unidirecionais.

Finalmente, propõe-se a arquitetura projetiva que engloba a funcionalidade do vetor  $\Lambda$  usando conhecimento heurístico aplicado num único controlador.

Constata-se que entre as arquiteturas aqui desenvolvidas, a compacta apresenta menor custo computacional. Todavia, isto não desmerece a concepção das demais arquiteturas, pois elas permitem que o especialista obtenha uma maior liberdade de incorporar sua heurística, aperfeiçoando o desempenho do SVMS. Além disso, o custo computacional torna-se irrelevante quando componentes dedicados a sistemas nebulosos são utilizados no *hardware* [Nascimento and Yoneyama, 2000, Jamshidi, 1993].

Contudo, apesar das soluções em SNHs e a proposta da máquina funcional reativa, o movimento do veículo pode ser insuficiente para evitar posturas singulares no manipulador.

No sentido de contornar tal limitação, o próximo capítulo propõe que o movimento do SVMS seja interpretado como um sistema híbrido. Esta interpretação permite uma complementação das abordagens apresentadas até aqui, e pode ser aplicada a outros sistemas robóticos redundantes, ou a outros compromissos de solução de redundância, como evitamento de colisões por exemplo.

# Capítulo 8

## Cinemática Híbrida

*Neste capítulo apresenta-se uma abordagem híbrida para evitar posturas singulares durante a operação de robôs redundantes e que conseqüentemente pode ser aplicada aos SVMS. Diferentemente das técnicas abordadas nos capítulos anteriores, o tratamento híbrido da cinemática serve como estratégia de complementação quando o movimento das juntas primárias originais não é suficiente para evitar posturas singulares. Neste sentido, a cinemática híbrida promove a troca entre juntas primárias e secundárias, o que permite uma "fuga" adicional da singularidade.*

### 8.1 Introdução

Recentemente, uma grande variedade de aplicações de robôs redundantes tem sido identificada. Estas atividades incorporam ações de aplicação fora do campo da manufatura como, nuclear, médica, combate ao fogo, operações de resgate e atividades submarinas. Este último é foco desta tese.

Como destacado anteriormente, o SVMS é um sistema intrinsecamente redundante, devido aos dof's adicionais que o veículo agrega ao manipulador.

A pesquisa sobre este tipo de sistema robótico é um assunto atual, promissor e depara-se com alguns desafios. Um deles e principal tópico em pesquisas sobre cinemática de robôs, trata das posturas singulares que o manipulador pode alcançar durante o desenvolvimento da tarefa.

Os capítulos anteriores apresentaram técnicas com o objetivo de evitar as configurações singulares no SVMS. Entretanto, devido à complexidade da cadeia cinemática do SVMS, estes controladores não impedem que posturas singulares ocorram, pois durante a execução da tarefa o movimento do veículo pode não ser suficiente para evitar a singularidade no manipulador.

Por outro lado, o avanço tecnológico promovido por recentes pesquisas de sistemas híbridos permitiu uma nova abordagem na solução da redundância de sistemas complexos como os SVMS. Esta abordagem consiste em interpretar o movimento de tais sistemas como uma seqüência de estados discretos, onde cada um destes estados é responsável por um segmento deste movimento.

Esta interpretação, aqui denominada de cinemática híbrida, permite modelar o movimento como um sistema híbrido, e serve como forma de superar o problema das singularidades através de estados cinemáticos que complementam a solução da redundância do SVMS.

A próxima seção apresenta conceitos fundamentais para compreensão da cinemática híbrida.

## 8.2 Preliminares

Um sistema dinâmico híbrido é basicamente um sistema cujo estado pode evoluir continuamente durante um período de tempo de acordo com um conjunto de equações diferenciais ou reiniciar abruptamente para novos valores com uma evolução governada por outro conjunto de equações diferenciais, com chaveamentos ativados tipicamente pela ocorrência de algum evento discreto [Davoren and Nerode, 1995].

Algumas das abordagens híbridas usam autômatos híbridos ou controle supervisorio. Os autômatos híbridos são sistemas de controle com uma determinada estrutura *interna* de controle e de chaveamento entre vários modos discretos, onde o comportamento contínuo em cada modo discreto é governado por um vetor de equações diferenciais. Por outro lado, a perspectiva de controle supervisorio em sistemas híbridos contém uma clara separação entre a planta e o controlador [Davoren and Nerode, 1995].

Nesta capítulo adota-se o formalismo de autômatos híbridos e a próxima seção mostra a modelagem cinemática de sistemas robóticos redundantes sob uma perspectiva híbrida.

### 8.3 Modelos de evitamento de singularidades

Esta seção apresenta uma metodologia de evitamento de singularidades. Esta metodologia considera que o movimento de um sistema robótico redundante é composto por uma seqüência de estados. Cada um destes estados contém uma disposição particular de juntas primárias e secundárias, e são denominados neste trabalho de estados cinemáticos [dos Santos et al., 2006e].

Estes estados cinemáticos são obtidos a partir de uma etapa preliminar, onde possíveis combinações de juntas secundárias são agrupadas em  $j$  matrizes secundárias ( $N_{sj}$ ). Vale ressaltar que o número destas possíveis matrizes é diretamente proporcional ao número de graus de liberdade do sistema robótico redundante.

Admite-se uma destas matrizes como o estado cinemático inicial, i.e. a matriz secundária no início da tarefa ( $N_{s_0}$ ).

Em seguida, calcula-se o determinante do estado cinemático inicial  $\det(N_{s_0}) = f_0(\theta_k)$ , onde  $f_0(\cdot)$  é função das  $k$  juntas que compõe o resultado do cálculo do determinante. Por outro lado, as  $(j - 1)$  matrizes secundárias restantes são classificadas por seus determinantes em relação ao estado inicial.

Neste sentido, admite-se que cada segmento da tarefa seja atribuído a uma seqüência de movimentos, que parte de um estado cinemático inicial  $N_{s_0}$ , para uma ou até três das seguintes classificações de estados cinemáticos:

- Estados cinemáticos do tipo 1 : Os determinantes das matrizes secundárias são funções de juntas que incluem as juntas do estado cinemático anterior  $\det(N_{s_1}) = f_1(\theta_p, \theta_k)$ , sendo  $p \neq k$ . Além de incluir  $\theta_k$ , estes estados podem ter uma expressão complementar em relação ao estado anterior, i.e.  $f_0 = \sin(\theta_k)$ , enquanto  $f_1 = \cos(\theta_p, \theta_k)$ ;
- Estados cinemáticos do tipo 2 : Os determinantes das matrizes secundárias são funções de juntas que não incluem as juntas do estado cinemático anterior  $\det(N_{s_2}) = f_2(\theta_p)$ . Assim como no caso anterior, estes estados podem ter uma expressão complementar em relação ao estado anterior, i.e.  $f_0 = \sin(\theta_k)$ , enquanto  $f_2 = \cos(\theta_p)$ ;
- Estados cinemáticos do tipo 3 : Onde a singularidade do estado cinemático inicial é evitada

por outro conjunto de estados cujos determinantes são independentes das posições das juntas, i.e.  $\det(N_{s_3}) = 1$  por exemplo. Este tipo de estado ocorre tipicamente em cadeias cinemáticas com juntas prismáticas, como em manipuladores móveis a exemplo do SVMS.

Nesta tese considera-se o evitamento de singularidades como a escolha do estado cinemático com índice de desempenho de maior valor ( $\gamma_{max}$ ) entre os estados de um mesmo tipo, quando o desempenho do estado corrente alcança valores abaixo de um determinado valor. Por outro lado, a mudança de tipo de estado ocorre se a soma dos desempenhos dos mesmos alcançar um valor de segurança, i.e.  $(\sum \gamma_i = \gamma_{saf})$ . Esta forma de escolha de  $\gamma_{max}$  cresce em relevância proporcionalmente ao grau de redundância do sistema robótico. Detalhes de simulação desta escolha são apresentados na seção 8.5.

A próxima subseção mostra o formalismo de autômatos híbridos, aqui adotado para modelar robôs redundantes como sistemas híbridos e posteriormente aplicado aos SVMS.

## 8.4 O autômato híbrido

Entre as técnicas de modelagem de sistemas híbridos, o autômato híbrido é a mais popular [Alur et al., 1995].

Um autômato híbrido é uma máquina de estados finitos com estados discretos  $\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ , onde cada um destes estados discretos tem dinâmicas contínuas associadas  $\dot{x} = f(l_i, x, w)$ , com  $x \in R^n$ , e entradas externas  $w \in W$ .

**Definição:** Um autômato híbrido é uma coleção  $M = (L, X, A, W, E, Inv, Act)$ , onde os símbolos têm os seguintes significados [Shaft and Schumacher, 2000]:

- $L$  : é um conjunto finito, chamado de conjunto de estados discretos. Estes estados são representados pelos vértices do grafo.
- $X$  : é o espaço de estados contínuo do autômato híbrido no qual as variáveis de estado contínuas  $x$  adquirem seus valores.
- $A$  : é um conjunto finito de símbolos os quais servem para classificar as conexões.

- $W$  é o espaço contínuo de comunicação no qual as variáveis contínuas externas  $w$  adquirem seus valores.
- $E$  : é um conjunto finito de conexões chamado de transições (ou eventos). Cada transição é definida por  $(l, a, Guarda_W, Salto_W, l')$ , onde  $l, l' \in L$ ,  $a \in A$ ,  $Guarda_W$  é um subconjunto de  $X$  e  $Salto_W$  é uma relação definida por um subconjunto de  $X \times X$ . A transição de um estado discreto  $l$  para  $l'$  é habilitada quando o estado contínuo  $x$  está em  $Guarda_W$ . Por outro lado, a transição do estado contínuo  $x$  para um valor  $x'$  é dada pela relação  $(x, x') \in Salto_W$ .
- $Inv$  : é o mapeamento das localizações  $L$  para os subconjuntos de  $X$ ,  $Inv(l) \subset X$  para todo  $l \in L$ . Quando o sistema encontra-se em  $l$ , o estado contínuo  $x$  deve satisfazer  $x \in Inv(l)$ . O subconjunto  $Inv(l)$  para  $l \in L$  é denominado de *invariante* da localização  $l$ .
- $Act$  : é o mapeamento que garante a cada localização  $l \in L$  um conjunto de equações algébricas diferenciais  $F_l$ , relacionando as variáveis contínuas  $x$  com suas derivadas  $\dot{x}$  e as variáveis contínuas externas  $w$ .

$$F_l(x, \dot{x}, w) = 0 \quad (8.1)$$

As soluções destas equações são denominadas *atividades* da localização.

Em síntese, a definição anterior estabelece que enquanto um sistema estiver em determinado estado discreto, suas variáveis evoluem de acordo com equações diferenciais, as quais especificam cada estado discreto. Enquanto as condições deste estado discreto forem verdadeiras, o sistema mantém-se neste estado discreto. Estas condições são denominadas de *invariantes*. Quando uma invariante evolui para uma condição falsa, o estado discreto deve ser trocado por outro. Neste caso, as variáveis contínuas podem ser reiniciadas pelas transições discretas (*Salto*) [Engell and Sivan, 2004]. Finalmente, a *Guarda* representa condições para que a troca entre os estados discretos ocorra.

Considerando a modelagem da seção anterior, o evitamento de singularidade pode ser modelado pelo autômato híbrido da Fig. 8.1.

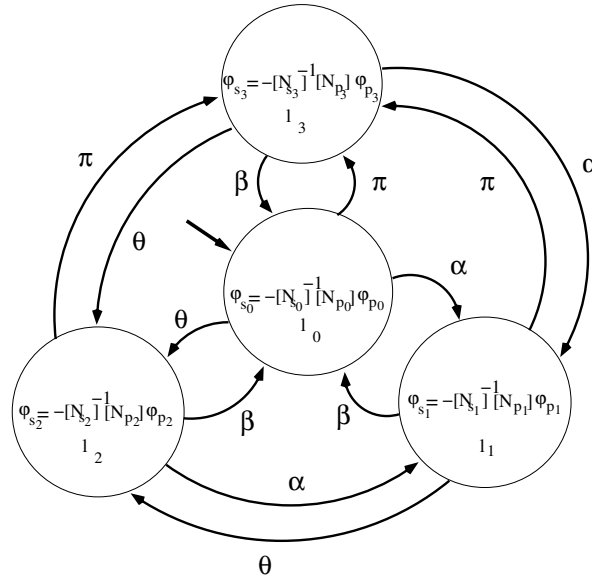


Figura 8.1: Autômato híbrido de 4 estados

O conjunto finito é  $L = \{l_0, l_1, l_2, l_3\}$ , onde os estados são definidos como se segue:

- $l_0$  é o estado inicial onde o movimento das juntas primárias é imposto por uma lei de interpolação polinomial que, devido à economia energética, mantém a posição constante;
- $l_1$  atua como um estado cinemático 1, onde  $\det(N_s)$  é uma combinação de juntas que incluem as juntas do estado inicial.
- No estado  $l_2$ ,  $\det(N_s)$  tem uma combinação de juntas sem as juntas do estado inicial.
- Por outro lado, no estado  $l_3$  a singularidade do estado cinemático original é evitada por independência de juntas,  $\det(N_s) = 1$  por exemplo. Este tipo de estado acontece quando a cadeia cinemática possui juntas prismáticas.

O conjunto finito de símbolos  $A$  é composto de  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\theta$  e  $\pi$ , os quais classificam as respectivas transições  $E$  com *Guardas*:  $(\gamma_0 = \gamma_{max})$ ,  $(\gamma_1 = \gamma_{max})$ ,  $(\gamma_2 = \gamma_{max})$  e  $(\gamma_3 = \gamma_{max})$ , onde  $\gamma_i$  é o desempenho do estado  $i$  e  $\gamma_{max}$  é o maior valor de desempenho entre os estados.

O espaço de comunicação  $W$  é composto pelas variáveis de entrada contínuas  $(\gamma_i)$ .

O cálculo das velocidades secundárias  $(\Psi_s)$  constitui o espaço contínuo  $X$ . Enquanto isso, a interação entre o cálculo de  $(\Psi_s)$  e as transições  $E$  representa as *atividades* da cinemática híbrida.

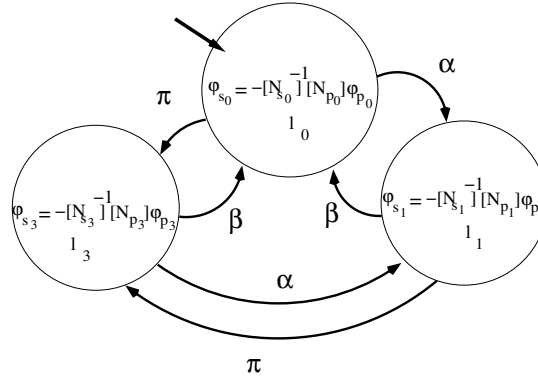


Figura 8.2: Autômato híbrido de 3 estados

Outro possível modelo de autômato híbrido é exibido na Fig. 8.2. Neste caso, as definições são as mesmas, exceto para o conjunto finito  $L = \{l_0, l_1, l_3\}$  e pelo conjunto finito de símbolos  $A$  ser composto de  $\beta, \alpha$  e  $\pi$ , os quais classificam as transições  $E$  com as respectivas *Guardas*, que definem:  $(\gamma_0 = \gamma_{max})$ ,  $(\gamma_1 = \gamma_{max})$  e  $(\gamma_3 = \gamma_{max})$ .

## 8.5 Simulação da cinemática híbrida

A idéia de encontrar o próximo estado cinemático consiste na simulação do movimento até a violação de alguma restrição. Neste caso, esta restrição pode ser definida de duas formas:

- A primeira forma de restrição pode ser  $(\gamma_i = 1)$  para os estados cinemáticos inicial ou dos tipos 1 e 2 ( $l_0, l_1, l_2$ );
- A segunda forma de restrição é dada por  $(\sum \gamma_i = \gamma_{saf})$  para o estado cinemático do tipo 3 ( $l_3$ ), i.e. a restrição acontece se a soma dos desempenhos dos outros estados alcançar um valor de condição segura ( $\gamma_{saf}$ ). Esta condição indica que a soma dos desempenhos



seja composta de parcelas onde ao menos um dos estados encontre-se fora da condição singular. Vale destacar que esta restrição é utilizada em condições onde não ocorrem singularidades, como em estados cinemáticos do tipo 3. Neste caso, o sistema híbrido adquire uma característica que a literatura em ciência da computação denomina de *deadlock*. Esta característica representa a situação onde não é possível a transição para outro estado discreto.

Se um destes eventos acontecer, é feita uma busca para encontrar o  $i_{th}$  estado cinemático o qual tenha o desempenho máximo ( $\gamma_{max}$ ).

Uma vez estabelecida, a transição entre os estados cinemáticos é desenvolvida de forma a preservar a continuidade das velocidades do robô. Neste sentido, o *Salto* não é considerado para evitar que descontinuidades ocorram, e as condições iniciais do estado cinemático seguinte passam a assumir os últimos valores de tempo, posição, velocidade e aceleração do estado anterior:

$$\xi_i = \begin{bmatrix} t_i & p_i & v_i & a_i \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

Entretanto, torna-se necessária a definição de uma regra para conduzir a junta primária do estado cinemático corrente.

Neste trabalho, a estratégia adotada aplica o agente reflexivo  $\alpha$  sobre a posição inicial  $p_i$ , capturada por  $\xi_i$ . A partir desta condição, desenvolve-se uma lei de interpolação polinomial sobre a posição de  $\xi_f$ . Por outro lado, considera-se que as velocidades sejam nulas ao final da trajetória, i.e. ( $v_f = a_f = 0$ ). Assim a posição final é dada por,

$$p_f = \alpha_j p_i, \quad (8.3)$$

onde  $\alpha_j$  é o agente reflexivo do  $j$ -ésimo estado ( $\alpha_j = 1/\gamma_j$ ). Intuitivamente,  $\alpha_j$  atua nesta aplicação como um fator de manobra da junta.

No sentido de evitar que a trajetória do efetuador sofra com os distúrbios provocados pelas transições, adota-se uma versão em malha fechada da formulação de Davies aplicada sobre as juntas que definem o movimento do efetuador, como destacado a seguir,

$$\Psi_e^* = [\Psi_{\phi_e}^* \ \Psi_{y_e}^* \ \Psi_{x_e}^*] \quad (8.4)$$

onde  $\Psi_e^* = \Psi_e + K(\varsigma_d - \varsigma)$ , sendo  $\varsigma_d$ ,  $\varsigma$  e  $K$  os vetores da posição desejada e corrente do efetuador e um ganho arbitrário respectivamente.

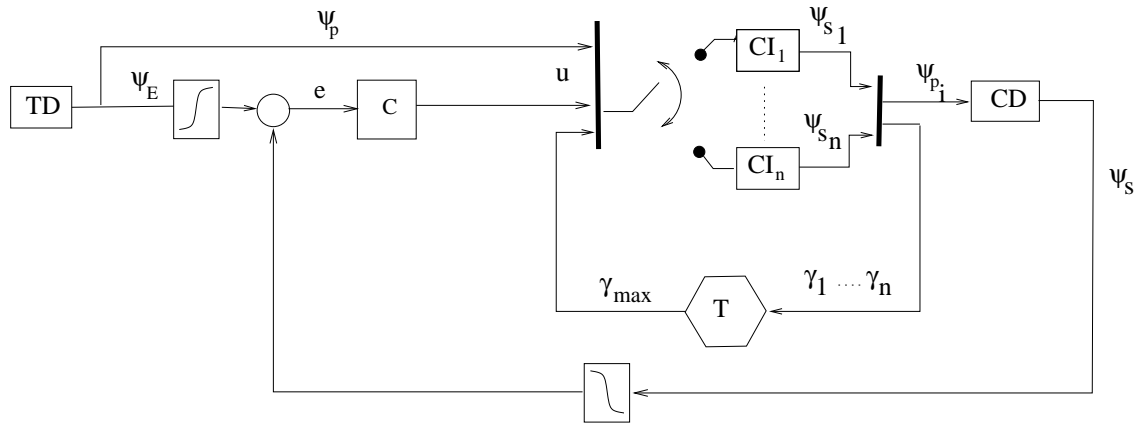


Figura 8.3: Diagrama de simulação da cinemática híbrida.

A Fig. 8.3 exibe o diagrama de simulação que implementa os autômatos híbridos anteriores. Neste diagrama, a trajetória desejada (TD) fornece o vetor de magnitudes primárias  $\Psi_p$ . Parte deste vetor é integrada ( $\varsigma_d$ ) e somada ao vetor das posições secundárias  $\varsigma$ , resultante da integração de  $\Psi_s$ . Este último é fornecido pela cinemática direta (CD).

Esta soma provê o erro da trajetória do efetuador  $e = (\varsigma_d - \varsigma)$ , no qual aplica-se o controle (C). Este controle atua tanto para reduzir o efeito do *drift* de integração, como o distúrbio provocado pela transição dos estados discretos. Cada um destes  $n$  estados contém uma cinemática inversa (CI). As magnitudes secundárias geradas por cada uma das CI's ( $\Psi_{s_n}$ ) atuam como entradas do bloco CD, i.e. estas entradas servem como magnitudes primárias ( $\Psi_p$ ) para a cinemática direta.

A transição entre as  $n$  CI's é desenvolvida pela lógica de transição (T), que recebe os desempenhos dos  $n$  estados discretos ( $\gamma_n$ ), e escolhe o maior dentre eles ( $\gamma_{max}$ ).

Com o objetivo de ilustrar a interpretação híbrida do movimento de robôs redundantes, a próxima seção apresenta alguns resultados de simulação deste autômato híbrido aplicado a um manipulador redundante composto de duas juntas prismáticas e quatro juntas rotativas (2P4R).

Esta cadeia cinemática é estrategicamente escolhida por ser equivalente à cadeia cinemática de um SVMS planar.

## 8.6 Exemplo de aplicação num manipulador robótico 2P4R

Nesta seção é desenvolvida uma análise em dois casos de modelagem de movimentos de robôs redundantes utilizando autômatos híbridos. Como ilustrado na Fig. 8.2, a primeira modelagem considera um autômato com apenas três estados, incluindo o estado inicial, enquanto a segunda modela o movimento como um autômato com quatro estados cinemáticos (veja Fig. 8.1).

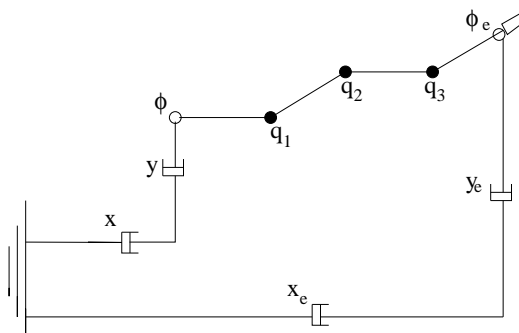


Figura 8.4: Cadeia cinemática fechada do manipulador 2P4R

Para apresentação de um estudo de caso, utiliza-se como exemplo o manipulador serial 2P4R. A Fig. 8.4 exibe a cadeia cinemática deste manipulador, a qual é fechada através da cadeia cinemática  $x_e y_e \phi_e$ , que representa o movimento do efetuador final e possibilita a aplicação do método de Davies.

Apresenta-se a seguir, alguns dos possíveis modelos de estados cinemáticos que compõem os autômatos híbridos e servem como exemplos de solução da redundância do manipulador 2P4R.

### 8.6.1 Estado inicial

Neste caso, admite-se que o vetor das juntas primárias do estado cinemático inicial  $l_0$  seja composto pelas magnitudes do efetuador final e a cadeia cinemática  $xy\phi$ ,

$$\Psi_{p_0} = \begin{bmatrix} \Psi_{x_e}^* & \Psi_{y_e}^* & \Psi_{\phi_e}^* & \Psi_x & \Psi_y & \Psi_\phi \end{bmatrix}, \quad (8.5)$$

enquanto o vetor das magnitudes secundárias é composto pelas três juntas rotativas restantes do manipulador,

$$\Psi_{s_0} = \begin{bmatrix} \Psi_{q_1} & \Psi_{q_2} & \Psi_{q_3} \end{bmatrix}. \quad (8.6)$$

Esta escolha de juntas primárias e secundárias provê a seguinte expressão para o determinante da matriz secundária,

$$\det[N_{s_0}] = a_1 a_2 \sin(\theta_2) \quad (8.7)$$

onde  $a_1$  e  $a_2$  são os comprimentos do primeiro e segundo elos do manipulador e  $\theta_2$  é o ângulo da junta rotativa  $q_2$ . Nota-se que o valor máximo  $\det[N_{s_0}]$  ocorre quando  $\sin(\theta_2) = 1$ . Neste caso, a vizinhança da singularidade é estabelecida como  $\theta_{sv} = 0.78$  rad.

### 8.6.2 Estado cinemático 1

O estado cinemático  $l_1$  possui um vetor de magnitudes primárias com a seguinte composição,

$$\Psi_{p_1} = \begin{bmatrix} \Psi_x & \Psi_{q_2} & \Psi_\phi & \Psi_{\phi_e}^* & \Psi_{x_e}^* & \Psi_{y_e}^* \end{bmatrix}, \quad (8.8)$$

enquanto o vetor das magnitudes secundárias é composto pela junta prismática  $y$  e as juntas rotativas  $q_1$  e  $q_3$ ,

$$\Psi_{s_1} = \begin{bmatrix} \Psi_y & \Psi_{q_1} & \Psi_{q_3} \end{bmatrix}. \quad (8.9)$$

Esta escolha resulta na seguinte expressão do determinante da matriz secundária,

$$\det[N_{s_1}] = a_1 \sin(\phi + \theta_1) + a_2 \sin(\phi + \theta_1 + \theta_2) \quad (8.10)$$

Neste caso,  $\det[N_{s_1}]$  é uma combinação das juntas do estado cinemático inicial ( $\theta_2$ ) e as juntas do estado cinemático corrente ( $\phi, \theta_1$ ).

A vizinhança da singularidade é estabelecida como  $(\phi + \theta_1)_{sv} = (\phi + \theta_1 + \theta_2)_{sv} = 0.5 \text{ rad}$ .

### 8.6.3 Estado cinemático 2

O vetor das magnitudes primárias do estado cinemático  $l_2$  tem a seguinte composição,

$$\Psi_{p_2} = \begin{bmatrix} \Psi_y & \Psi_{q_3} & \Psi_\phi & \Psi_{\phi_e}^* & \Psi_{x_e}^* & \Psi_{y_e}^* \end{bmatrix}. \quad (8.11)$$

enquanto o vetor das magnitudes secundárias é composto pela junta prismática  $x$  e as juntas rotativas  $q_1$  e  $q_2$ ,

$$\Psi_{s_2} = \begin{bmatrix} \Psi_x & \Psi_{q_1} & \Psi_{q_2} \end{bmatrix}. \quad (8.12)$$

A escolha de juntas primárias e secundárias deste estado cinemático acarreta na seguinte expressão do determinante da matriz secundária,

$$\det[N_{s_2}] = a_1 \cos(\phi + \theta_1). \quad (8.13)$$

Neste caso,  $\det[N_{s_2}]$  é uma combinação de juntas que exclui a junta do estado cinemático inicial ( $\theta_2$ ) e caracteriza-se por ser suplementar, i.e. para o estado cinemático inicial  $\det[N_s] = \sin(\cdot)$ , enquanto o estado cinemático 2 tem  $\det[N_s] = \cos(\cdot)$ . A vizinhança da singularidade adotada é  $(\phi + \theta_1)_{sv} = 1,15 \text{ rad}$ .

### 8.6.4 Estado cinemático 3

No estado cinemático  $l_3$ , o vetor das magnitudes primárias tem a seguinte composição,

$$\Psi_{p_3} = \begin{bmatrix} \Psi_{x_e}^* & \Psi_{y_e}^* & \Psi_{\phi_e}^* & \Psi_{q_1} & \Psi_{q_3} & \Psi_\phi \end{bmatrix}, \quad (8.14)$$

enquanto o vetor das magnitudes secundárias defini-se por,

$$\Psi_{s_3} = \begin{bmatrix} \Psi_x & \Psi_y & \Psi_{q_2} \end{bmatrix} \quad (8.15)$$

Com esta escolha de magnitudes primárias e secundárias, o determinante da matriz secundária é definido pela seguinte expressão,

$$\det[N_{s_3}] = 1. \quad (8.16)$$

Nota-se claramente a independência das juntas. Como destacado anteriormente, esta independência ocorre pelas juntas prismáticas constituírem a matriz secundária.

Apesar da escolha de outros estados cinemáticos com características equivalentes ser possível, este trabalho limita-se aos estados cinemáticos anteriores. Por outro lado, estados cinemáticos adicionais aumentam as opções de evitamento de singularidades.

### 8.6.5 Análise de simulação

Nesta tarefa, o efetuador deve seguir uma trajetória de 2 m ao longo de eixo  $x$  e, após uma parada, deve seguir uma trajetória de 1,5 m ao longo do eixo  $y$ . Simultaneamente, a orientação  $\phi$  alinha-se na direção de 0,52 rads como destacado na Fig. 8.5. A duração da simulação é 25 segundos.

#### 8.6.5.1 Autômato híbrido com 3 estados

Nesta seção é realizada a análise de simulação para um autômato híbrido de três estados cinemáticos, equivalente ao da Fig. 8.2. Neste caso, analisando o histórico dos índices de desempenho da Fig. 8.6, nota-se que a primeira seta, da esquerda para direita, indica que o índice do estado cinemático inicial  $\gamma_0$  alcança um valor abaixo da unidade. Assim, a *Guarda* do autômato estabelece o chaveamento para o estado cinemático 1, pois o índice de desempenho deste estado ( $\gamma_1$ ) é o de valor mais alto quando o evento ocorre.

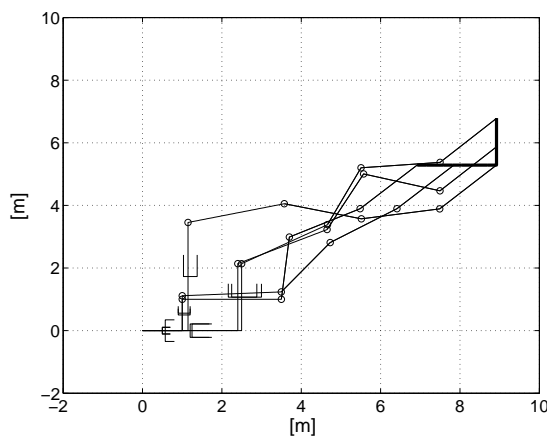


Figura 8.5: Visão do manipulador 2P4R durante a tarefa.

Contudo, após alguns segundos outro chaveamento é necessário, desde que  $\gamma_1$  assume valores abaixo do valor unitário. Em virtude disto, o estado cinemático três ( $\gamma_3$ ) passa a reger o movimento do manipulador pois sua independência das juntas permite o sistema evitar a singularidade.

Para evitar o *deadlock* intrínseco ao estado cinemático do tipo 3, aplica-se uma *invariante* particular, a qual estabelece a atuação do respectivo estado até que a soma dos desempenhos dos demais estados alcance um valor seguro. Este valor seguro representa a região de operação que permite o chaveamento para pelo menos um estado fora da singularidade. No presente caso, esta região é representada pela soma de valor  $\gamma_{saf} = 2, 2$ .

Quando esta região é alcançada, nota-se na Fig. 8.6, que o sistema robótico volta a ser conduzido pelo estado cinemático inicial, pois trata-se do estado de maior índice de desempenho quando o evento ocorre. Nesta etapa, as juntas prismáticas são conduzidas por uma lei de interpolação polinomial de quinta ordem para manter a posição atual.

Cada um dos eventos anteriormente relatados é indicado por setas na Fig. 8.6.

Ainda na Fig. 8.6, mostra-se o efeito da transição dos estados sob a norma do erro de posição do efetador. Este efeito é contornado pela aplicação do controle de laço fechado com ganho de  $K = 1$ .

A Fig. 8.7 expõe que o movimento da cadeia cinemática  $xy\phi$  não sofreu descontinuidades.

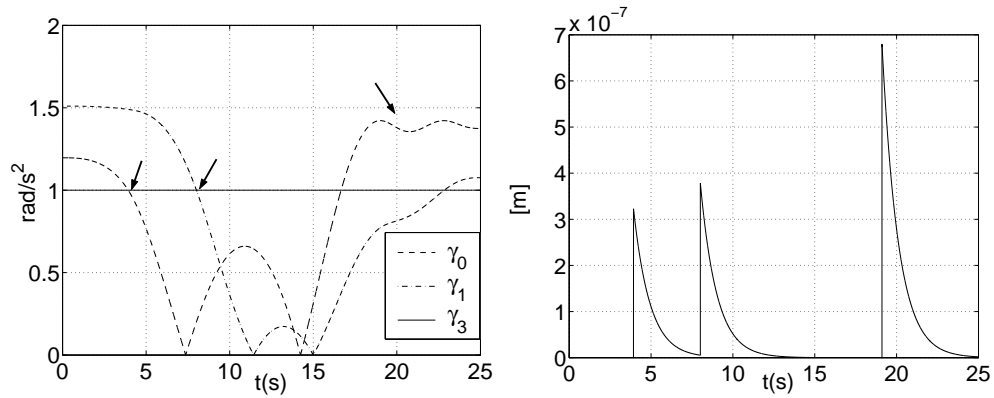


Figura 8.6: Evolução dos desempenhos dos estados e norma do erro de posição do efetuador para 3 estados

Enquanto isso, a Fig. 8.8 exibe a junta  $q_2$  atravessando a condição singular do estado cinemático inicial e a continuidade das velocidades das juntas rotativas preservada.

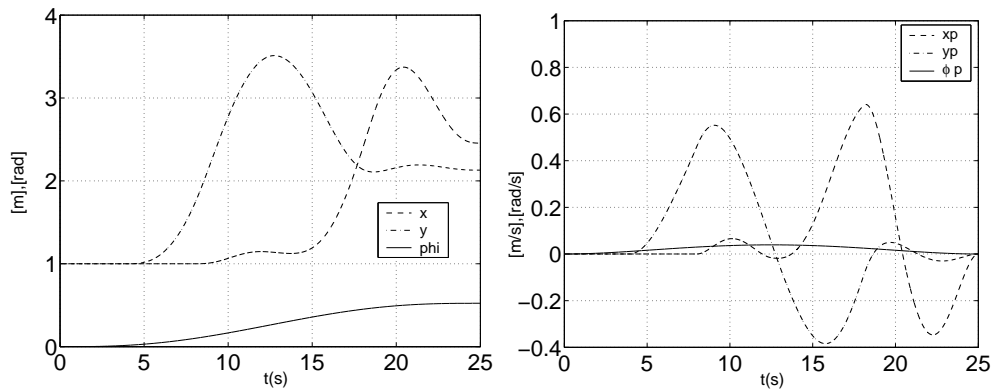


Figura 8.7: Posição e velocidade das juntas prismáticas  $x, y$  e da junta de orientação  $\phi$  para 3 estados



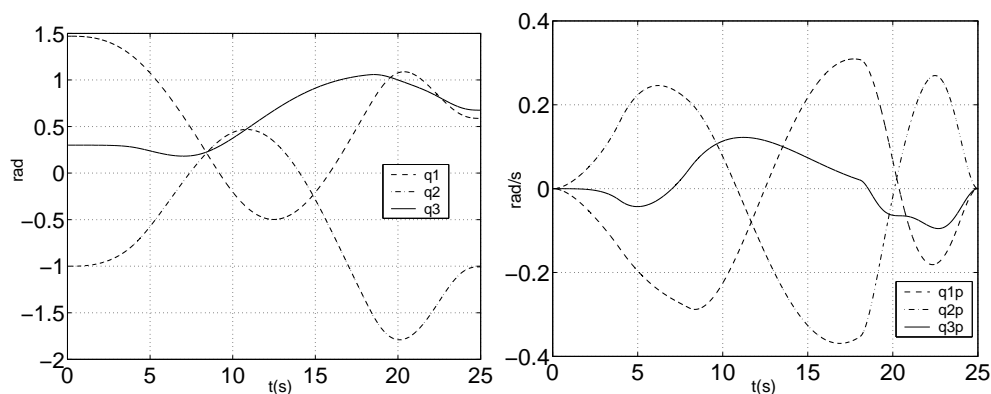


Figura 8.8: Posição e velocidade das juntas  $q_1$ ,  $q_2$  e  $q_3$  para 3 estados.

#### 8.6.5.2 Autômato híbrido com 4 estados

Nesta seção é realizada uma análise do movimento do manipulador 2P4R regido pelo modelo de autômato híbrido da Fig. 8.1. Como no caso anterior, a Fig. 8.9 mostra que o desempenho do estado inicial  $\gamma_0$  alcança valores inferiores à unidade.

Após o autômato avaliar qual dos estados possui o maior desempenho, é feita a escolha do estado cinemático 1. Entretanto, após alguns segundos outro evento ocorre, pois o desempenho corrente  $\gamma_1$  adquire valores na região de singularidade. Assim, o estado cinemático 2 com  $\gamma_2$  passa a conduzir o movimento, desde que seu desempenho é o maior entre os demais estados quando o evento ocorre. Cada um destes eventos é destacado por uma seta na Fig. 8.9.

Como destacado no caso anterior, a Fig. 8.9 mostra ainda que o controle de malha fechada atua de forma a contornar as perturbações que as transições entre os estados cinemáticos causam sob a trajetória do efetuador.

Nota-se na Fig. 8.10 que o movimento das juntas prismáticas é reduzido pela imposição de uma lei de interpolação polinomial, a qual impõe a permanência do veículo sob a mesma posição corrente quando o evento é detectado.

Observa-se na Fig. 8.11 que a continuidade do movimento das juntas é preservada.

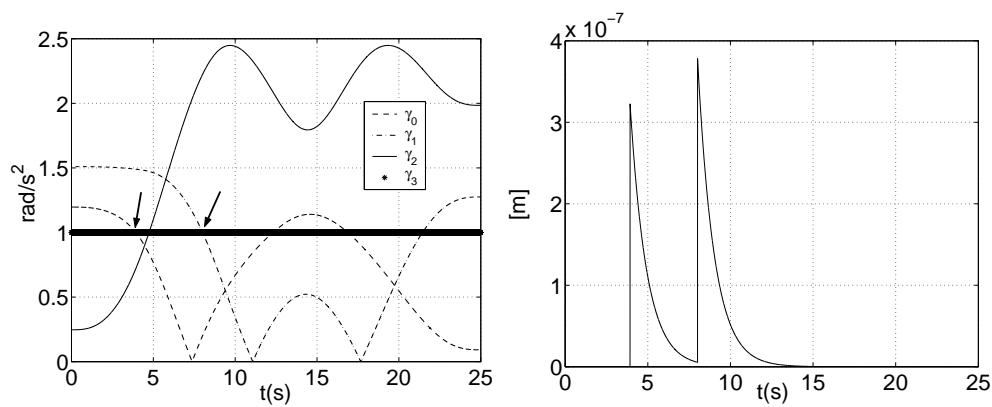


Figura 8.9: Evolução dos desempenhos dos estados e norma do erro de posição do efetuador

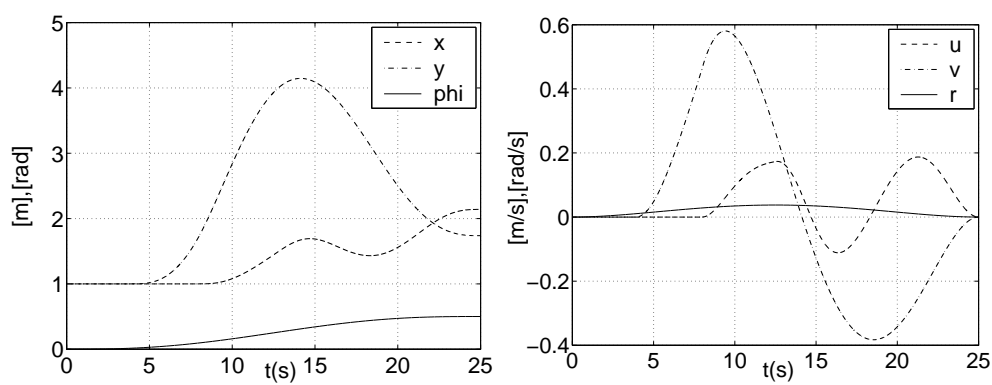


Figura 8.10: Posição e velocidade das juntas prismáticas  $x, y$  e da junta de orientação  $\phi$  para 4 estados

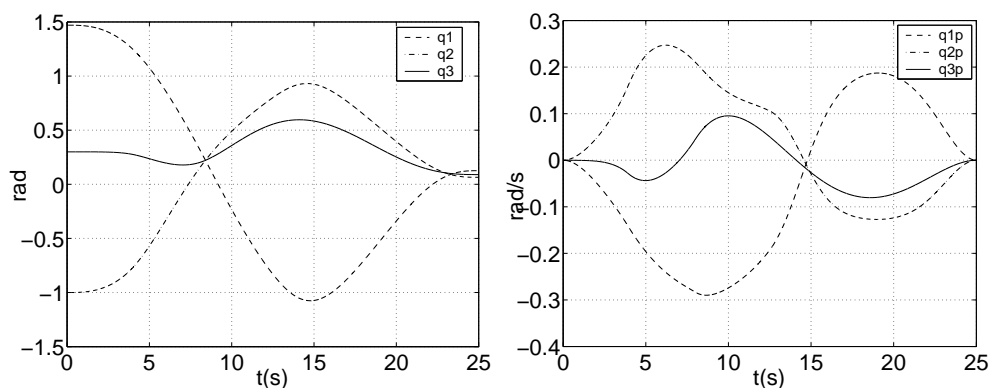


Figura 8.11: Posição e velocidade das juntas  $q_1$ ,  $q_2$  e  $q_3$  para 4 estados.

## 8.7 Conclusões

Foi desenvolvida uma abstração do movimento de sistemas robóticos redundantes como uma sequência de estados, o que configura uma abordagem híbrida da cinemática.

Constata-se que a cinemática híbrida promove, através da troca entre magnitudes primárias e secundárias, novas possibilidades de fuga de posturas singulares.

Desta forma, a cinemática híbrida permite que as técnicas anteriormente desenvolvidas ampliem o espaço de trabalho de robôs redundantes sem que ocorram descontinuidades durante seus movimentos.

Portanto, a cinemática híbrida pode ser empregada como estratégia complementar às técnicas desenvolvidas nesta tese. Além disso, acredita-se que a aplicação desta técnica possa ser expandida para outras formas de solução de redundância. Todavia, este capítulo apresenta apenas resultados iniciais e acredita-se que os mesmos incentivem futuras pesquisas.

O próximo capítulo apresenta um exemplo de simulação, empregando esta estratégia complementar na atuação da arquitetura neuro-reativa sob o SVMS.

## Capítulo 9

# Resultados de Simulações

*Neste capítulo apresentam-se resultados de simulações que comparam o desempenho entre estratégias de controle cinemático clássicas e as propostas desenvolvidas nesta tese.*

### 9.1 Modelos para simulação

Os modelos cinemáticos do sistema veículo-manipulador submarino *SVMS* convencional [Antonelli and Chiaverini, 1998] e pelo método de Davies estão respectivamente especificados nos apêndices *B* e *A*. Estes modelos são baseados no modelo real de um *SVMS* com nove graus de liberdade pertencente à Escola de Pós-graduação Naval de Monterey (EUA) [Healey and Lienard, 1987] com um braço manipulador planar de três graus de liberdade. O veículo tem um comprimento de 5 metros e cada elo do manipulador tem um comprimento de 2 metros. Neste trabalho, os resultados iniciais são restritos ao plano do manipulador, o qual é montado horizontalmente, ver Fig. 9.1. Embora resultados espaciais não sejam validados neste trabalho, as metodologias apresentadas nesta tese podem ser expandidas para casos tridimensionais.

A configuração inicial do veículo é dada por

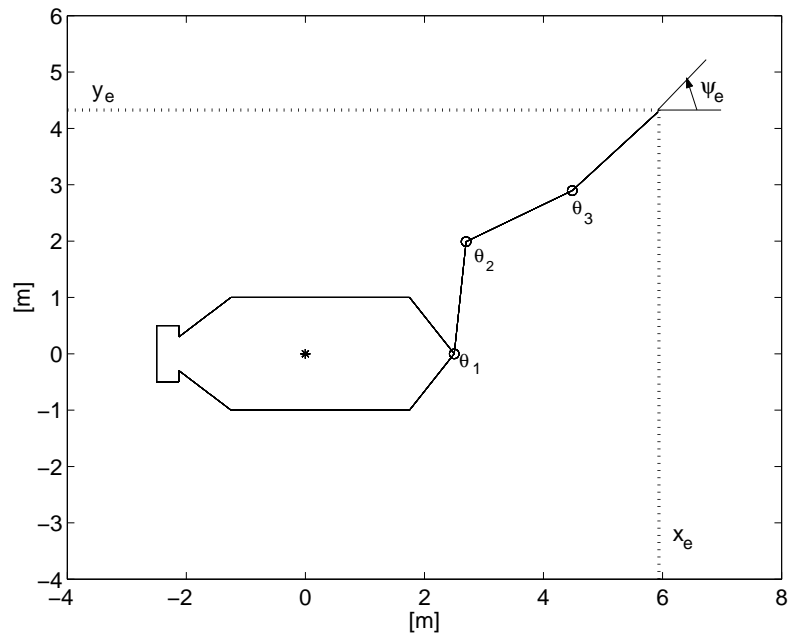


Figura 9.1: Sistema Veículo-Manipulador Submarino no plano XY

$$\begin{aligned} x &= 0m, \\ y &= 0m, \\ \Psi &= 0rad, \end{aligned} \tag{9.1}$$

e os ângulos das juntas são

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 1.47rad, \\ \theta_2 &= -1.00rad, \\ \theta_3 &= 0.30rad, \end{aligned} \tag{9.2}$$

correspondendo à seguinte posição do efetuador-final

$$\begin{aligned} x_e &= 5.92m, \\ y_e &= 4.29m, \\ \Psi_e &= 0.77rad. \end{aligned} \tag{9.3}$$

A seção seguinte destaca a formulação das trajetórias que serão simuladas.

## 9.2 Trajetórias no espaço da tarefa

Como apresentado anteriormente, o problema de controle tratado nas simulações do *SVM* consiste no critério de redução do consumo de energia associado a compensar os distúrbios causados pelas correntes marítimas enquanto uma determinada trajetória deve ser seguida pelo efetuador-final. Isto pode ser obtido para veículos com determinada geometria que necessite o alinhamento dos mesmos com a orientação da corrente marinha. Além disto, os mesmos precisam ter o mínimo de movimento possível. Por outro lado, no intuito de evitar descontinuidades, consideram-se trajetórias suaves. Assim, neste trabalho as trajetórias compreendem: a posição, a velocidade e a aceleração. Esta última é justificada por seu cálculo garantir continuidade da derivada da cinemática diferencial em nível de velocidade.

As simulações são realizadas para dois tipos de trajetórias:

- Trajetória retilínea,
- Trajetória circular.

### 9.2.1 Trajetórias retilíneas

Para tanto, define-se um polinômio de 5ª ordem para a interpolação da posição no espaço da tarefa.

Assim, arbitram-se os valores iniciais  $(x_o, y_o)$  e finais  $(x_f, y_f)$  das coordenadas cartesianas das posições desejadas. Após definir o período de duração da trajetória, determina-se que suas respectivas derivadas sejam nulas nas extremidades da mesma, ou seja:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i = \dot{y}_i = 0; \quad \dot{x}_f = \dot{y}_f = 0; \\ \ddot{x}_i = \ddot{y}_i = 0; \quad \ddot{x}_f = \ddot{y}_f = 0. \end{aligned} \tag{9.4}$$

Para o caso da coordenada  $x$ , polinômio de 5ª ordem é dado por:

$$x(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0, \tag{9.5}$$

onde as suas derivadas são:

$$\begin{aligned}\dot{x}_t &= 5a_5t^4 + 4a_4t^3 + 3a_3t^2 + 2a_2t + a_1t; \\ \ddot{x}_t &= 20a_5t^3 + 12a_4t^2 + 6a_3t + 2a_2.\end{aligned}\tag{9.6}$$

Portanto, os coeficientes  $(a_5, a_4, a_3, a_2, a_1, a_0)$  são incógnitas. Entretanto, os seguintes dados são conhecidos: os instantes iniciais e finais  $(t_i, t_f)$  que definem o período do trajeto, além das posições, velocidades e acelerações iniciais e finais da trajetória  $(x_i, x_f), (\dot{x}_i, \dot{x}_f), (\ddot{x}_i, \ddot{x}_f)$ . Estes dados permitem a montagem de um sistema de equações para a respectiva coordenada  $x$ :

$$\begin{aligned}x_i &= a_5t_i^5 + a_4t_i^4 + a_3t_i^3 + a_2t_i^2 + a_1t_i + a_0, \\ x_f &= a_5t_f^5 + a_4t_f^4 + a_3t_f^3 + a_2t_f^2 + a_1t_f + a_0, \\ \dot{x}_i &= 5a_5t_i^4 + 4a_4t_i^3 + 3a_3t_i^2 + 2a_2t_i + a_1; \\ \dot{x}_f &= 5a_5t_f^4 + 4a_4t_f^3 + 3a_3t_f^2 + 2a_2t_f + a_1; \\ \ddot{x}_i &= 20a_5t_i^3 + 12a_4t_i^2 + 6a_3t_i + 2a_2. \\ \ddot{x}_f &= 20a_5t_f^3 + 12a_4t_f^2 + 6a_3t_f + 2a_2.\end{aligned}\tag{9.7}$$

ou no formato matricial:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ x_f \\ \dot{x}_i \\ \dot{x}_f \\ \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_i^5 & t_i^4 & t_i^3 & t_i^2 & t_i & 1 \\ t_f^5 & t_f^4 & t_f^3 & t_f^2 & t_f & 1 \\ 5t_i^4 & 4t_i^3 & 3t_i^2 & 2t_i & 1 & 0 \\ 5t_f^4 & 4t_f^3 & 3t_f^2 & 2t_f & 1 & 0 \\ 20t_i^3 & 12t_i^2 & 6t_i & 2 & 0 & 0 \\ 20t_f^3 & 12t_f^2 & 6t_f & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_5 \\ a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix}\tag{9.8}$$

De posse do sistema de equações lineares anterior, obtêm-se os valores dos coeficientes do polinômio através de algum método de resolução deste tipo de sistema. Neste trabalho é aplicada a *Regra de Cramer* (ver [Strang, 1988] para mais detalhes).

### 9.2.2 Trajetórias circulares

O procedimento para obtenção de trajetórias circulares é descrito através dos seguintes passos:

1. Inicialmente são fornecidos os dados que localizam o centro da circunferência em relação à posição do efetuador-final  $(x_c, y_c)$ . Além disto, devem ser obtidos os dados que identificam o ângulo inicial e final do trajeto polinomial  $(\theta_i, \theta_f)$ .
2. De posse dos dados do item anterior e da posição inicial do efetuador-final  $(x_{ef_i}, y_{ef_i})$ , pode-se calcular o ângulo geométrico inicial entre o efetuador-final e a base inercial através da seguinte formulação:

$$\theta_o = \text{Atan2} \left[ \frac{(y_{ef_i} - y_c)}{(x_{ef_i} - x_c)} \right] \quad (9.9)$$

A justificativa do uso da função arcotangente ( $\text{Atan2}(y, x)$ ) de dois argumentos, consiste na mesma computar a razão  $y/x$ , mas utilizar o sinal de cada argumento para determinar em qual quadrante o ângulo resultante localiza-se. Desta forma, permite-se uma correta determinação do ângulo no intervalo de 0 a  $2\pi$  [Sciavicco and Siciliano, 1996].

3. Neste ponto é calculado o raio da trajetória:

$$R = \sqrt{((x_c - x_{ef_i})^2 + (y_c - y_{ef_i})^2)} \quad (9.10)$$

4. O desenvolvimento da trajetória é feito através de um polinômio de quinta ordem que calcula a variação do ângulo entre a posição inicial  $(\theta_i)$  e final  $(\theta_f)$ . Onde os coeficientes são calculados da mesma forma que realizado na trajetória retilínea, usando o método de Cramer. O polinômio da posição angular e suas respectivas derivadas são apresentas na seqüência.



$$\begin{aligned}
\Theta &= a_{5\theta} t^5 + a_{4\theta} t^4 + a_{3\theta} t^3 + a_{2\theta} t^2 + a_{1\theta} t + a_{0\theta}, \\
\dot{\Theta} &= 5a_{5\theta} t^4 + 4a_{4\theta} t^3 + 3a_{3\theta} t^2 + 2a_{2\theta} t + a_{1\theta}, \\
\ddot{\Theta} &= 20a_{5\theta} t^3 + 12a_{4\theta} t^2 + 6a_{3\theta} t + 2a_{2\theta}.
\end{aligned} \tag{9.11}$$

5. De posse dos dados fornecidos nos itens anteriores, calculam-se as coordenadas da trajetória circular no espaço Cartesiano e suas respectivas derivadas.

$$\begin{aligned}
X_{ef} &= R \cos(\theta_o + \Theta) + x_c, \\
Y_{ef} &= R \sin(\theta_o + \Theta) + y_c, \\
\dot{X}_{ef} &= -\dot{\Theta} R \sin(\theta_o + \Theta), \\
\dot{Y}_{ef} &= \dot{\Theta} R \cos(\theta_o + \Theta), \\
\ddot{X}_{ef} &= -[\ddot{\Theta} R \sin(\theta_o + \Theta) + \dot{\Theta}^2 R \cos(\theta_o + \Theta)], \\
\ddot{Y}_{ef} &= \ddot{\Theta} R \cos(\theta_o + \Theta) - \dot{\Theta}^2 R \sin(\theta_o + \Theta).
\end{aligned} \tag{9.12}$$

## 9.3 Estratégias de controle cinemático simuladas

Nesta seção as estratégias de controle cinemático convencionais Pseudoinversa e Prioridade da Tarefa são apresentadas com detalhes no intuito de posteriormente comparar seus desempenhos com as técnicas baseadas em IA.

### 9.3.1 Pseudoinversa ponderada

Como comentando anteriormente, para um *SVMS* o mapeamento

$$\dot{x}_E = J_E(\eta, q)\zeta. \tag{9.13}$$

relaciona o vetor de velocidades  $\zeta$  de dimensão  $(6 + n)$  com o vetor de velocidades da tarefa do efetuador-final  $\dot{x}_E$  através da matriz Jacobiana  $J_E$  de dimensão  $(m \times (6 + n))$ . Inverter este mapeamento cinemático que relaciona as velocidades do espaço de trabalho com as velocidades do *SVMS* é um problema relevante devido a este sistema tratar-se de um sistema intrinsecamente redundante. Desta forma, este problema admite infinitas soluções.

Uma forma bastante difundida para solucionar tal questão pode ser escrita na seguinte maneira

$$\zeta = J_E^\dagger(\eta, q)\dot{x}_E. \quad (9.14)$$

sendo

$$J_E^\dagger(\eta, q) = J_E^T(\eta, q)(J_E(\eta, q)J_E^T(\eta, q))^{-1}. \quad (9.15)$$

onde  $J_E^\dagger(\eta, q)$   $((6+n) \times m)$  é denominada de Pseudoinversa Moore-Penrose de  $J_E$ . Entretanto, além da inconsistência dimensional destacada no Capítulo 3, esta solução apresenta inconvenientes em sua aplicação aos SVMS, tais como: a) para uma dada velocidade do efetuador-final, resulta no movimento de ambos veículo e manipulador, o que não é desejado sob o ponto de vista energético; b) os graus de liberdade redundantes não são totalmente explorados. Estes problemas acontecem devido à ausência de coordenação entre os movimentos do veículo e do manipulador, a qual considere a diferença entre suas dinâmicas [Antonelli and Chiaverini, 2003].

Uma forma tradicional de otimizar a exploração dos graus de liberdade do SVMS consiste na aplicação da versão generalizada da solução por Pseudoinversa, denominada de inversa generalizada ponderada ou Pseudoinversa ponderada [Sciavicco and Siciliano, 1996]. A expressão desta solução é destacada a seguir,

$$J_E^\dagger(\eta, q) = W^{-1}J_E^T(\eta, q)(J_E(\eta, q)W^{-1}J_E^T(\eta, q))^{-1}. \quad (9.16)$$

sendo  $W$  a matriz de pesos responsável pela coordenação de movimento entre veículo e manipulador, exposta em detalhes a seguir,

$$W^{-1} = \begin{bmatrix} (1-\beta)I_6 & 0_{6 \times n} \\ 0_{6 \times n} & \beta I_n \end{bmatrix}, \quad (9.17)$$

onde  $I$  é a matriz identidade e  $\beta$  representa o índice relacionado com a manipulabilidade, variando num intervalo  $[0,1]$ . Assim, quando  $\beta = 0$  corresponde ao movimento apenas do veículo e quando  $\beta = 1$  corresponde ao movimento apenas do manipulador.

### 9.3.2 Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades

A proposta de aplicação da técnica de resolução de redundância Prioridade da Tarefa foi originalmente aplicada a um *SVMS* por Antonelli em 1998. Naquele trabalho foi considerado o critério para garantir a coordenação do movimento entre o veículo e o manipulador, explorando os graus de liberdade adicionais da redundância do sistema. Neste sentido, os vetores das tarefas primárias  $\xi_p$  e de tarefas secundárias  $\xi_s$  são definidos de forma que os dois não entrem em conflito; quando entrarem em conflito, a tarefa secundária é liberada em detrimento da tarefa primária. Como destacado no capítulo 3, o vetor de velocidades do veículo/manipulador  $\zeta$  é então calculado por

$$\zeta = J_p^\dagger \dot{\xi}_p + (I_N - J_p^\dagger J_p) J_s^\dagger \dot{\xi}_s \quad (9.18)$$

onde  $J_p$  e  $J_s$  são os Jacobianos primário e secundário, respectivamente. Como existe a necessidade de coordenação entre o movimento do veículo e do manipulador, a pseudoinversa da matriz primária é calculada em sua versão com pesos.

Além disto, considera-se que a tarefa secundária tem prioridade mais baixa em relação à tarefa primária e para tanto, a mesma é projetada no espaço nulo do Jacobiano da tarefa primária através da parcela  $(I_N - J_p^\dagger J_p)$ .

No sentido de evitar o problema típico de *drift* durante a integração numérica do vetor das velocidades, uma nova versão da Eq. (9.18) pode ser obtida da seguinte forma:

$$\zeta = J_p^\dagger w_p + (I_N - J_p^\dagger J_p) J_s^\dagger w_s \quad (9.19)$$

sendo:

$$\begin{aligned} w_p &= \dot{\xi}_{p,d} + K_p(\xi_{p,d} - \xi_p) \\ w_s &= \dot{\xi}_{s,d} + K_s(\xi_{s,d} - \xi_s) \end{aligned} \quad (9.20)$$

onde o subscrito  $d$  denota valores desejados para as variáveis relevantes e  $K_p$ ,  $K_s$  são matrizes de ganho definidas positivas.

No caso de um *SVM*, o vetor das tarefas primárias frequentemente inclui o vetor de tarefas do efetuador-final, enquanto o vetor das tarefas secundárias deve incluir as coordenadas de posição do veículo. Esta escolha é feita para garantir que o veículo movimente-se o mínimo possível durante a execução da tarefa do manipulador. Portanto, considerando o sistema apresentado na Fig. 9.1 caracterizado com seis graus de liberdade onde as coordenadas do veículo são dadas por  $x, y, \psi$  e as coordenadas do efetuador final são  $x_e, y_e, \psi_e$  todas expressas no sistema fixo à terra; as três coordenadas do veículo  $z, \theta, \phi$  consideradas constantes. Observa-se o critério energético que considera a necessidade de alinhamento do veículo com a corrente oceânica implica a inclusão da orientação do veículo ao vetor das variáveis primárias. Assim, para fins de implementação, considera-se como tarefa primária a posição do efetuador-final e a orientação do veículo,

$$\xi_p = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \Psi_e \\ \Psi \end{bmatrix}, \quad (9.21)$$

e como tarefa secundária a posição do veículo,

$$\xi_s = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (9.22)$$

O valor final desejado de orientação do veículo é de  $0,78rad$  dado por um suposto sensor de corrente, sendo este movimento regido por uma interpolação polinomial de quinta ordem, durante um período de 10s. Os ganhos do algoritmo são

$$\begin{aligned} K_p &= diag\{10, 10, 10, 1\} \\ K_s &= diag\{2, 2\} \end{aligned} \quad (9.23)$$

Resultados obtidos em [Antonelli and Chiaverini, 1998] mostram que, apesar desta metodologia minimizar o movimento do veículo, ela não cancela totalmente estes movimentos quando os mesmos são desnecessários. Além disso, a Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades não impede que o manipulador aproxime-se perigosamente de posturas singulares.

### 9.3.3 Máquina funcional reativa

Para ilustrar o desempenho da proposta da máquina funcional reativa, propõe-se o exemplo apresentado no capítulo 6, novamente exibido na Fig. 9.2. Admite-se uma vizinhança de singularidade sob 0.78 rad. A função de ativação  $\text{sig}(x)$  é aplicada e os pesos são calculados com o índice de regulação  $\hat{w}$  (ver capítulo 6).

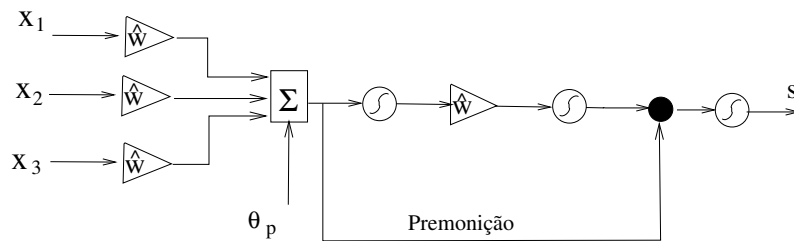


Figura 9.2: Máquina funcional reativa com premonição.

Esta simples máquina funcional será utilizada nas simulações do SVMS planar.

### 9.3.4 Sistemas Nebulosos-Híbridos

As três arquiteturas nebulosas híbridas são implementadas de acordo com o capítulo 7. Para as arquiteturas supervisória e compacta, re-exibidas nas Figs. 9.3 e 9.4, consideram-se os seguintes valores a serem interpolados para saída do controle  $\alpha$ .

*Para a arquitetura supervisória:*

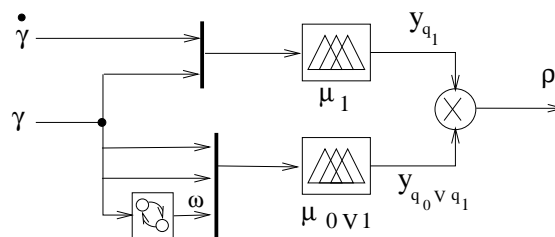


Figura 9.3: Arquitetura supervisória

o controle alto positivo (CAP)=1; o controle pequeno positivo (CPP)=0,5; repouso = 0; movimento = 1; grau de utilização ( $\kappa$ )=2.

*Para a arquitetura compacta:*

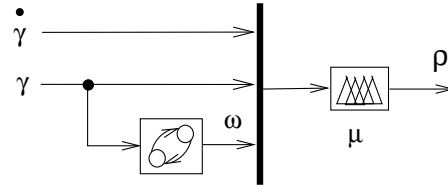


Figura 9.4: Arquitetura compacta

controle alto positivo (CAP)=1,5; controle médio positivo (CMP)=0,8; controle pequeno positivo (CPP)=0,4; grau de utilização ( $\kappa$ )= 3.

No caso da arquitetura projetiva da Fig. 9.5, os valores que definem as saídas de velocidade do veículo são posteriormente destacados.

*Para a arquitetura projetiva:*

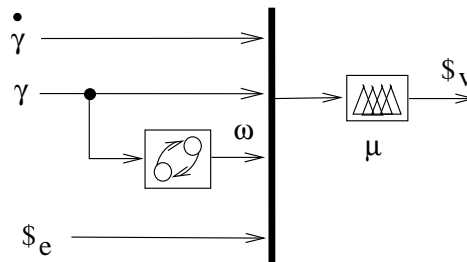


Figura 9.5: Arquitetura projetiva

velocidade alta negativa (VAN) = -0,7; velocidade alta positiva (VAP) = 0,7; velocidade média negativa (VMN) = -0,45; velocidade média positiva (VMP) = 0,45; velocidade pequena negativa (VPN) = -0,2; velocidade pequena positiva (VPP) = 0,2;

## 9.4 Simulações

Nestas simulações foi usado um passo de integração de 0.1 segundos através do método de Euler. As trajetórias são desenvolvidas a partir de uma interpolação de quinta ordem com

velocidades e acelerações iniciais e finais nulas.

Os simuladores usam a ferramenta *SIMULINK* pertencente ao *software MATLAB* versão 6.1.

### 9.4.1 Trajetória retilínea repetitiva

Nesta seção são expostos alguns resultados da trajetória retilínea que inicia-se na mesma configuração inicial do sistema e que não pode ser desenvolvida apenas pelo movimento do manipulador, embora ainda seja considerado o critério de mínimo deslocamento do veículo submarino. Assim, o veículo precisa movimentar-se o mínimo necessário para garantir o seguimento da trajetória do efetuador final. Nesta tarefa, desenvolve-se uma trajetória retilínea de  $2m$  ao longo do eixo  $x$  durante um período de 12,5 segundos, retornando da mesma forma para a posição inicial em 12,5 segundos. Este ciclo se repete em mais 25 segundos. Durante estes 50 segundos, o veículo reorienta-se até  $\phi = 0,52$  rad, no sentido de minimizar o efeito da corrente, enquanto a orientação final do efetuador é de  $\phi_e = 0,78$  rad. A Fig. 9.6 apresenta a visão do movimento que o sistema deve realizar.

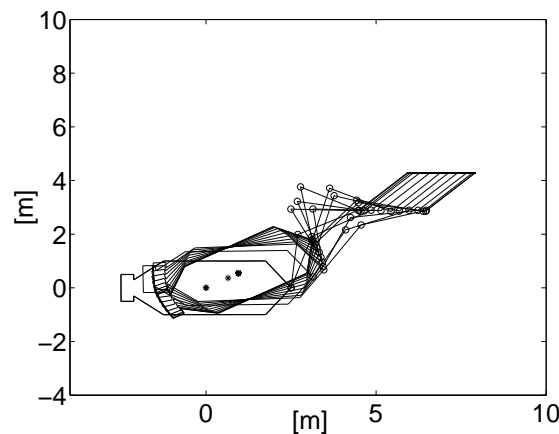


Figura 9.6: Visão planar da tarefa retilínea.

Os resultados das simulações relacionadas ao movimento veículo submarino são expostos nas figuras seguintes, e acompanhados de análises comparativas entre as estratégias Pseudoinversa

Ponderada , Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades, Máquina Funcional Reativa e as Arquiteturas Nebulosas Híbridas.

#### 9.4.1.1 Pseudoinversa ponderada e Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades

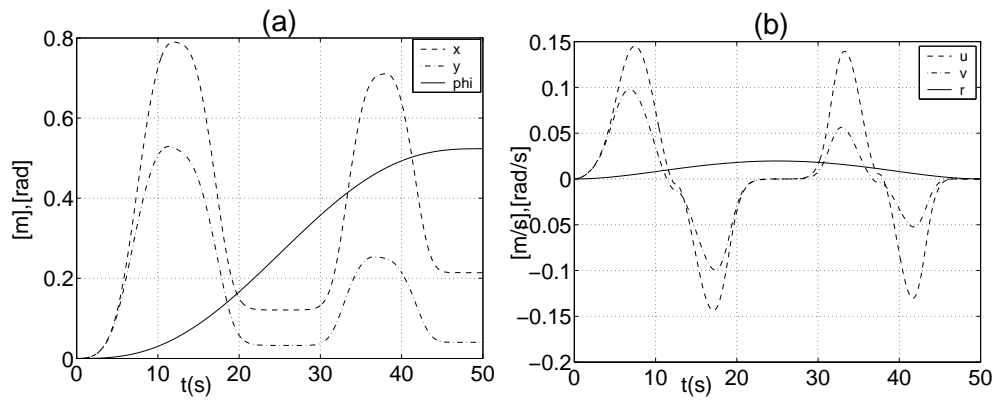


Figura 9.7: Pseudoinversa ponderada: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo

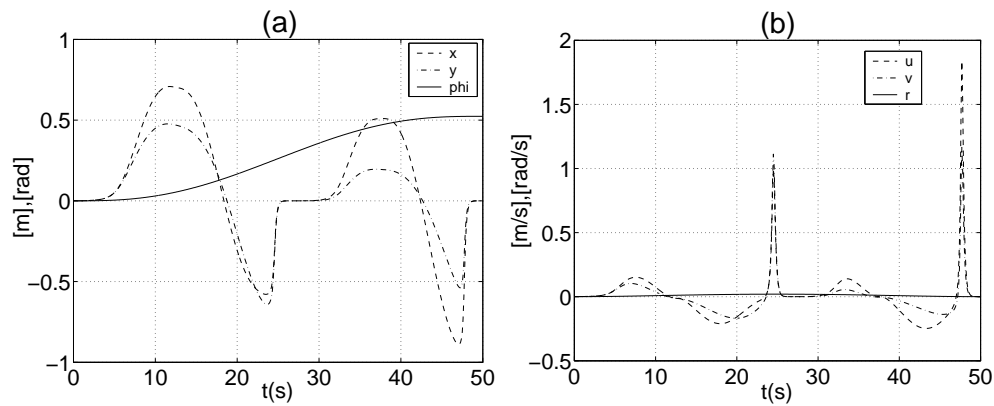


Figura 9.8: Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo

Uma comparação entre as Fig's. 9.7 e 9.8 mostra que a Pseudoinversa ponderada apresenta



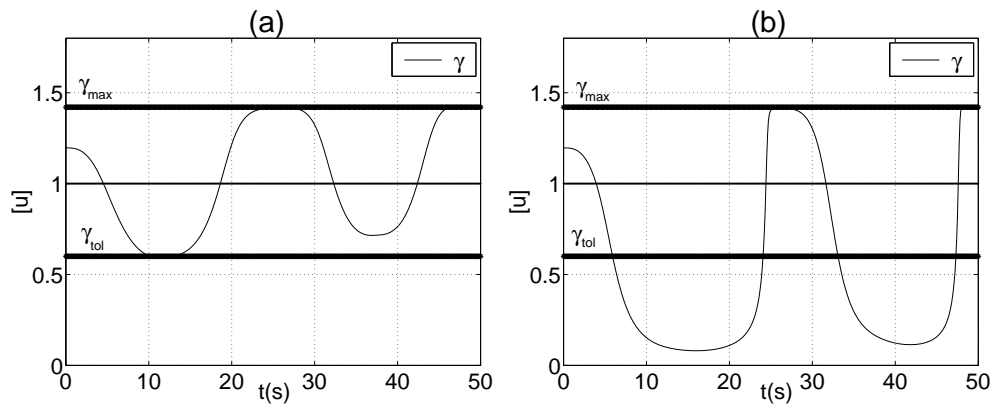


Figura 9.9: Histórico do desempenho  $\gamma$ : (a) Pseudoinversa ponderada, (b) Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades

uma menor movimentação do veículo, quando comparada à Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades. Além disso, a Fig. 9.9 revela que a Pseudoinversa Ponderada apresenta valores mais seguros de desempenho comparados a Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades.

#### 9.4.1.2 Máquina Funcional Reativa

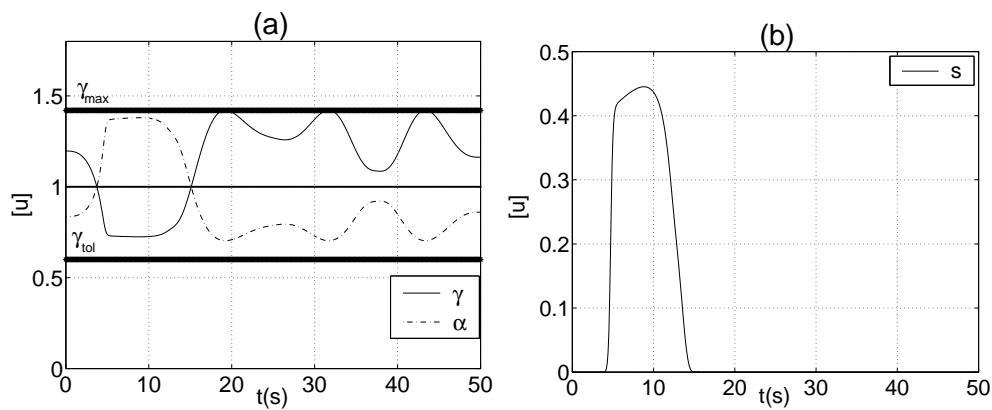


Figura 9.10: (a) histórico do desempenho  $\gamma$  e do agente  $\alpha$ , (b) saída da máquina funcional reativa

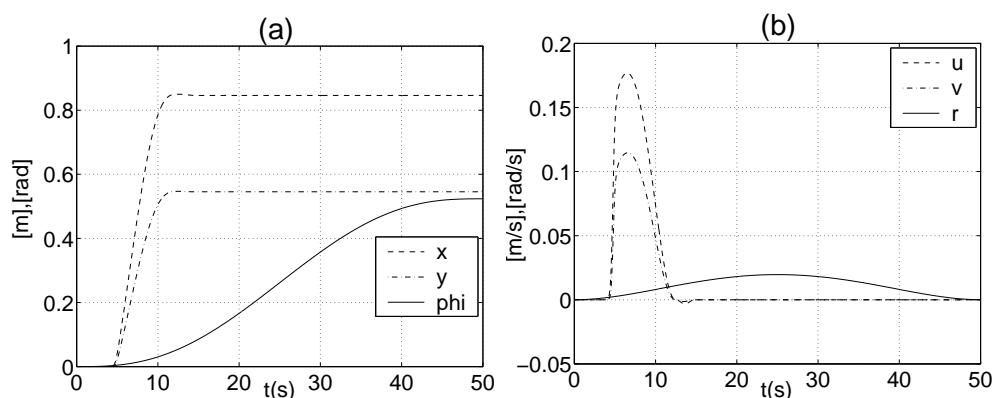


Figura 9.11: Máquina Funcional Reativa: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo

A Fig. 9.10 mostra que o desempenho cai a valores da vizinhança da singularidade, o que desencadeia a ativação da Máquina Funcional Reativa exibida ao lado. Contudo, o caso simples desta máquina apresenta valores de desempenho mais seguros, comparados às implementações baseadas em Pseudoinversa Ponderada e Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades.

Na Fig. 9.11 são apresentados o comportamento da posição e da velocidade do veículo, notadamente de menores amplitudes ao serem comparados às técnicas tradicionais anteriores. Adicionalmente, confirma-se o resultado da Máquina Funcional, onde o veículo se move apenas o necessário para evitar a singularidade, ficando parado durante o tempo restante da tarefa.

#### 9.4.1.3 Arquitetura nebulosa híbrida supervisória

A Fig. 9.12 mostra a queda do desempenho e a respectiva ativação nebulosa híbrida. Enquanto isso, a Fig. 9.13 mostra que o veículo se movimenta mais que a Máquina Funcional Reativa, devido à transição nebulosa do supervisor. A Fig. 9.14 expõe o perfil do desempenho.

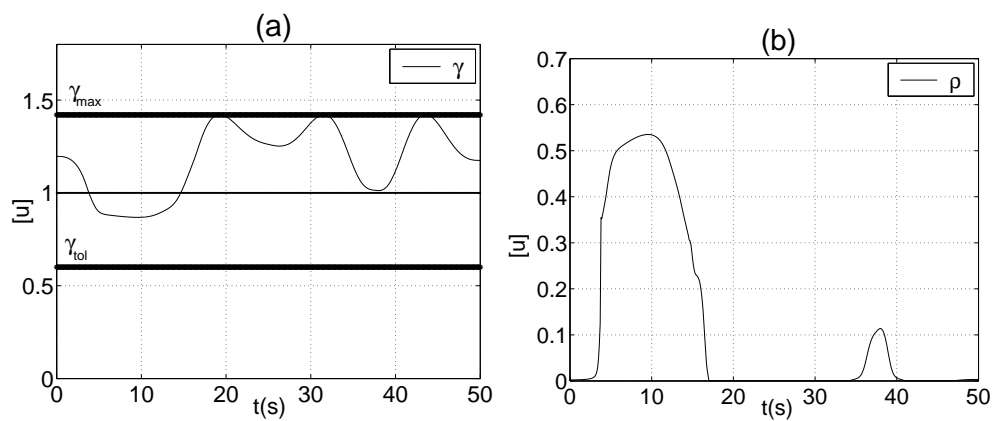


Figura 9.12: (a) histórico do desempenho  $\gamma$ , (b) ativação da arquitetura supervisória

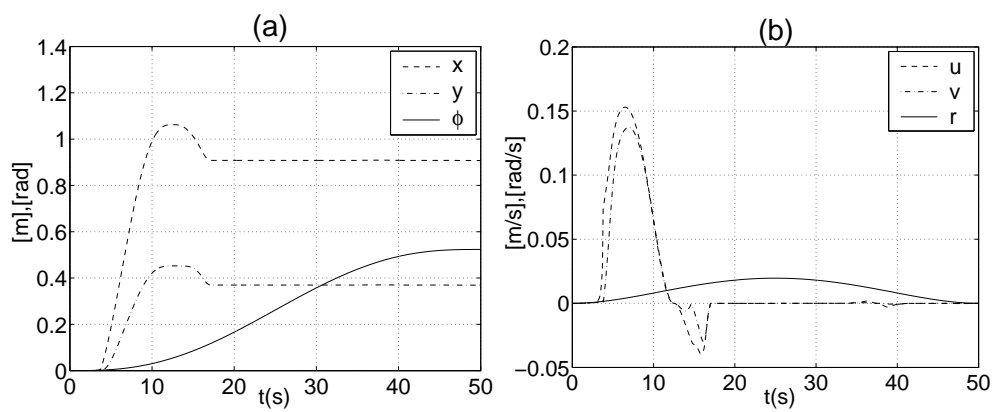


Figura 9.13: Arquitetura supervisória: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo

#### 9.4.1.4 Arquitetura nebulosa híbrida compacta

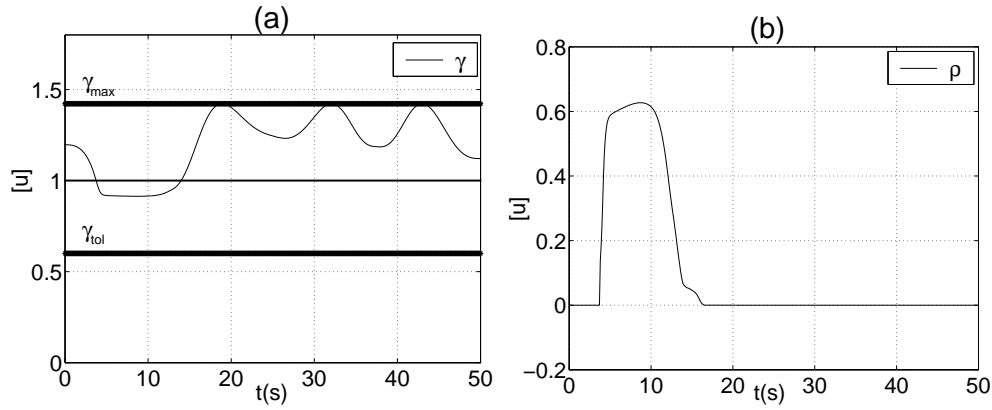


Figura 9.14: Arquitetura compacta: (a) histórico do desempenho  $\gamma$  (b) ativação da arquitetura compacta

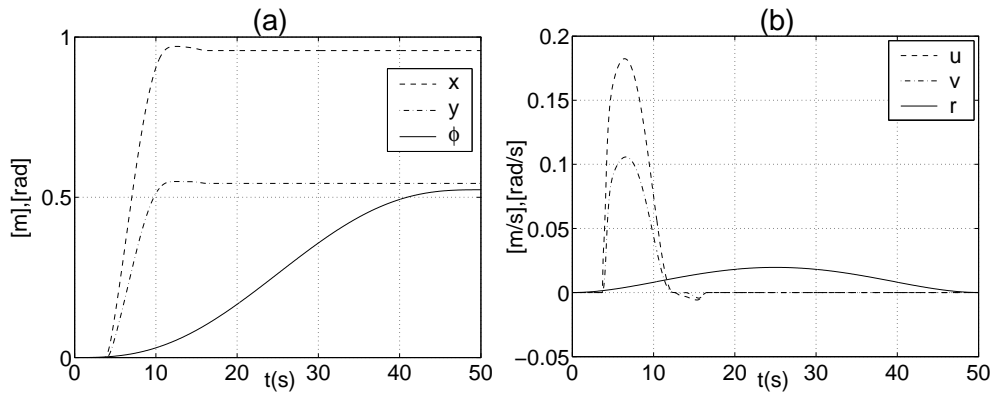


Figura 9.15: Arquitetura compacta: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo.

Nota-se na Fig. 9.14 que a queda do desempenho para os valores ajustados foi bem reduzida. Todavia, deve ser ressaltado que a ativação através da Máquina Funcional Reativa também pode alcançar desempenho semelhante com um projeto mais elaborado, i.e. mais entradas ou uma combinação de mais funções sigmoidais ou ambos.

Enquanto isso, a Fig. 9.15 exibe um movimento do veículo menor que arquitetura supervisória e ligeiramente maior ao obtido pela Máquina Funcional Reativa.

#### 9.4.1.5 Arquitetura nebulosa híbrida projetiva

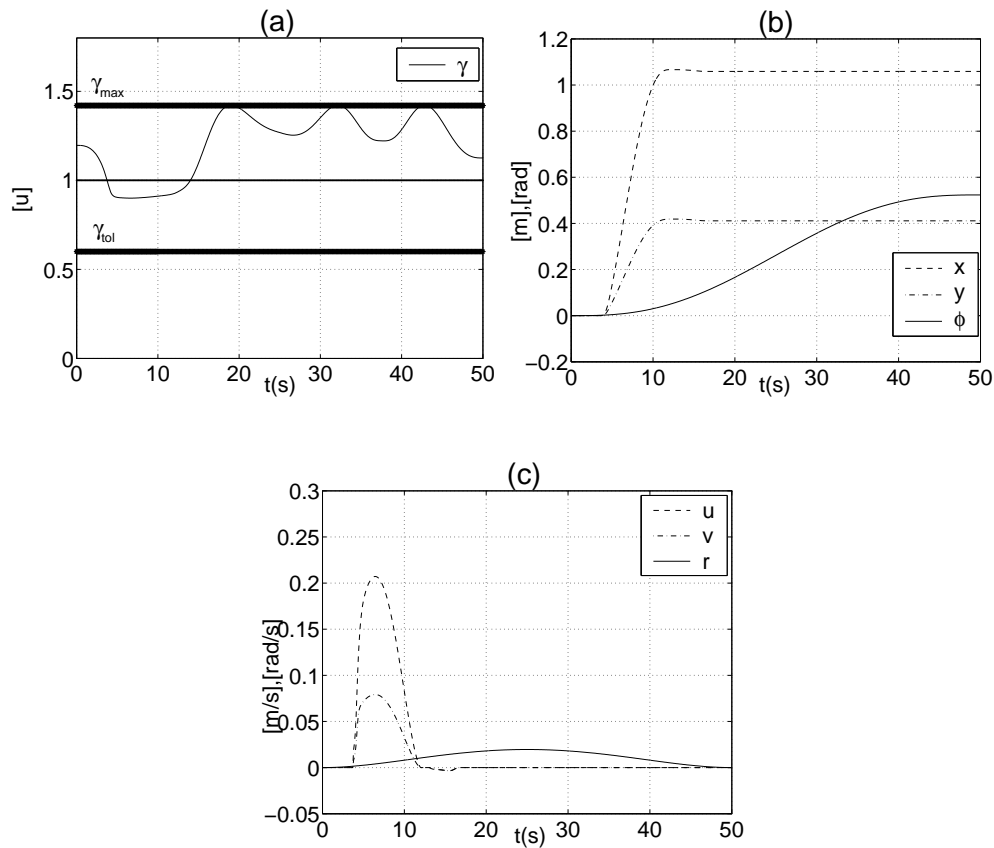


Figura 9.16: Arquitetura projetiva: (a) histórico do desempenho  $\gamma$ , (b) posição do veículo, (c) velocidade do veículo.

A Fig. 9.16 exibe uma movimentação do veículo bem próxima à arquitetura nebulosa híbrida compacta e à Máquina Funcional Reativa. Por outro lado, menor que os resultados usando a arquitetura supervisória.

A partir dos resultados obtidos nesta seção, observa-se que as propostas desta tese mostraram que a tarefa pode ser implementada impondo movimento ao veículo durante apenas o período

necessário para evitar a singularidade.

Com o objetivo de reforçar estas constatações, a próxima subseção apresenta outro caso comparativo.

### 9.4.2 Trajetória circular repetitiva

Nesta seção são expostos os resultados da trajetória circular que inicia-se na mesma configuração inicial do sistema. Assim, equivalente a tarefa analisada anteriormente, o veículo precisa movimentar-se o mínimo possível para garantir o seguimento da trajetória do efetuador final. Nesta tarefa considera-se o alinhamento do veículo na direção da corrente e adicionalmente, observa-se a repetibilidade da trajetória em duas voltas numa circunferência de  $1.4m$  de diâmetro durante um período de 40 segundos, como exposto na Fig. 9.17.

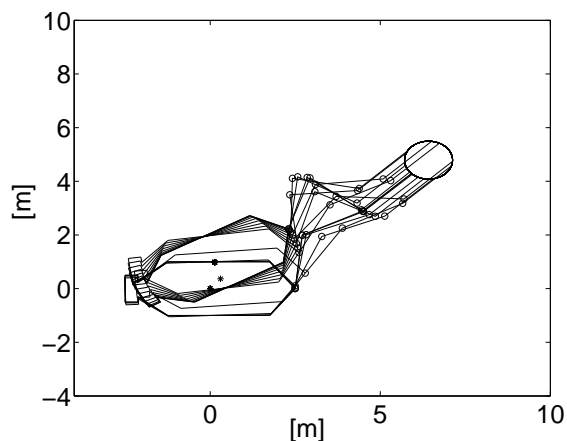


Figura 9.17: Visão planar da tarefa circular.

Assim como realizado na subseção anterior, os resultados associados à posição e velocidade do veículo são comentados na sequência.

#### 9.4.2.1 Pseudoinversa ponderada e Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades

Uma comparação entre as Figs. 9.18 e 9.19 revela que a Pseudoinversa ponderada movimentar-se menos que a Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades.

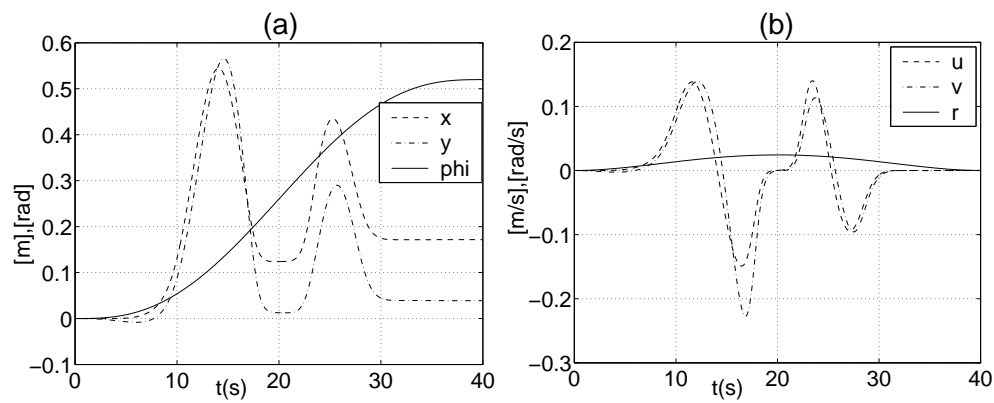


Figura 9.18: Pseudoinversa ponderada: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo.

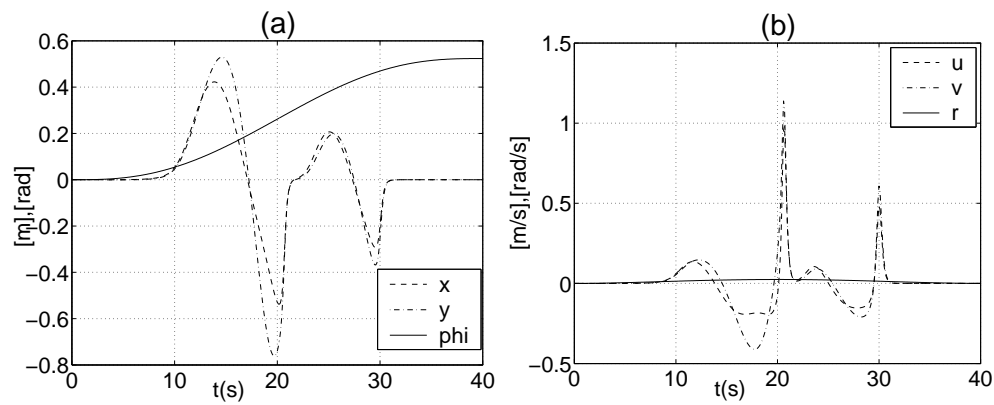


Figura 9.19: Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo.

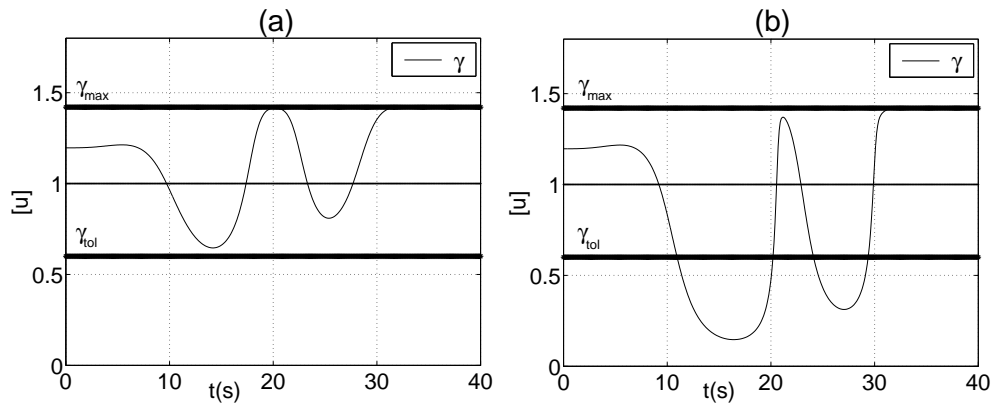


Figura 9.20: Histórico do desempenho  $\gamma$ : (a) Pseudoinversa Ponderada, (b) Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades

A Fig. 9.20 mostra que a Pseudoinversa Ponderada tem um perfil de desempenho mais seguro, comparado a Prioridade da Tarefa Robusta a Singularidades.

#### 9.4.2.2 Máquina Funcional Reativa

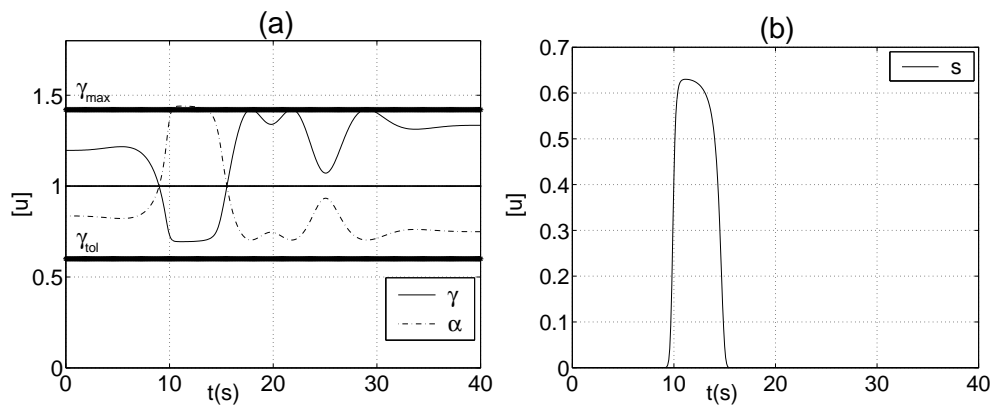


Figura 9.21: (a) histórico do desempenho  $\gamma$  e do agente  $\alpha$ , (b) saída da Máquina Funcional Reativa.



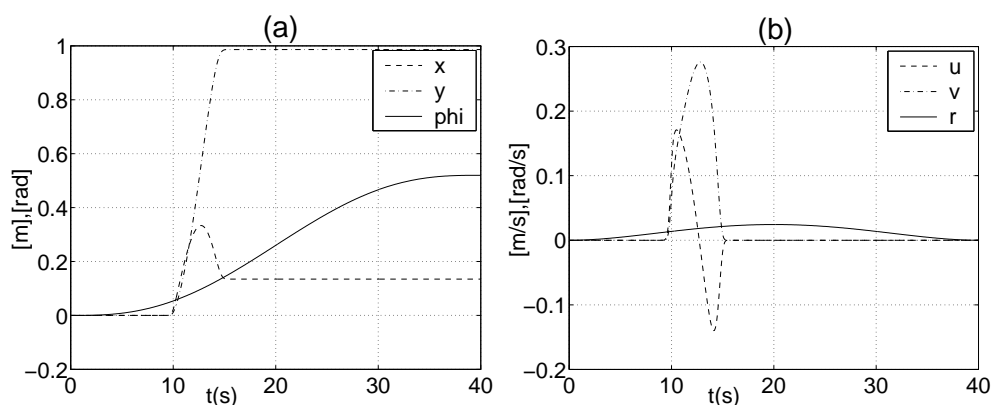


Figura 9.22: Máquina Funcional Reativa: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo.

A Fig. 9.21 mostra a necessidade de movimento do veículo, detectada pela queda do desempenho e a respectiva saída da Máquina Funcional Reativa. Entretanto, o histórico deste desempenho é mais seguro que as técnicas baseadas em Pseudoinversa, anteriormente apresentadas.

Na Fig. 9.22 são apresentados os valores de posição e velocidade alcançados pelo veículo. Diferentemente das técnicas tradicionais, nota-se que a movimentação do veículo é necessária durante apenas um breve período da trajetória, sem acarretar em grandes solicitações de velocidade.

#### 9.4.2.3 Arquitetura nebulosa híbrida supervisória

A Fig. 9.23 mostra a queda do desempenho e a respectiva ativação nebulosa híbrida. Percebe-se que os valores de desempenho são mais seguros comparados aos métodos tradicionais. Adicionalmente, nota-se que a flexibilidade desta arquitetura permite que a velocidade do veículo seja reduzida. Por outro lado, neste caso, esta redução pode implicar movimentação adicional, i.e. o movimento do veículo é solicitado mais de uma vez. Observa-se na Fig. 9.24 o movimento adicional, após o primeiro ciclo.

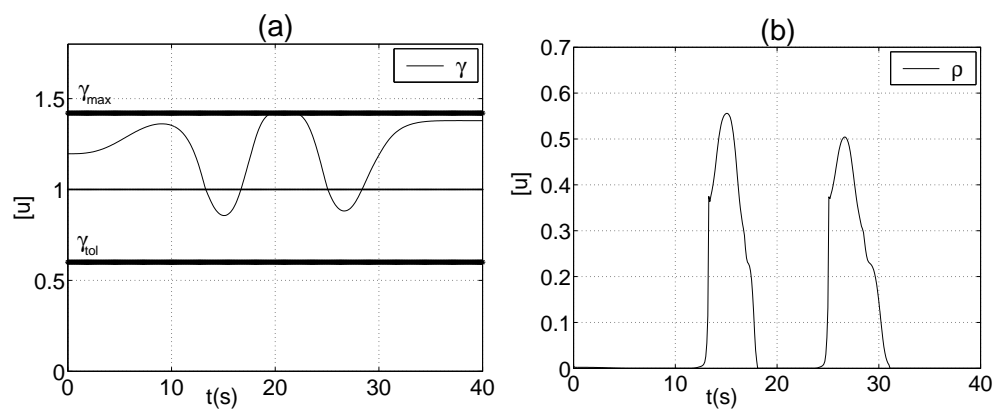


Figura 9.23: (a) histórico do desempenho  $\gamma$ , (a) ativação supervisória

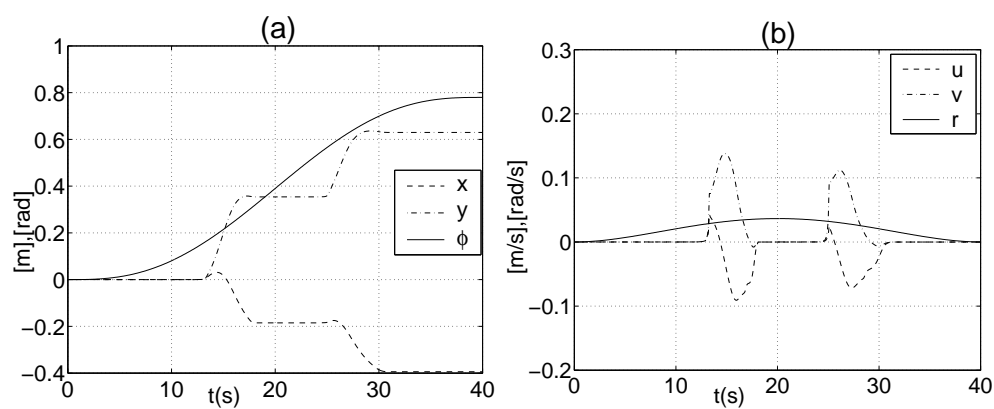


Figura 9.24: Arquitetura supervisória: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo.

#### 9.4.2.4 Arquitetura nebulosa híbrida compacta

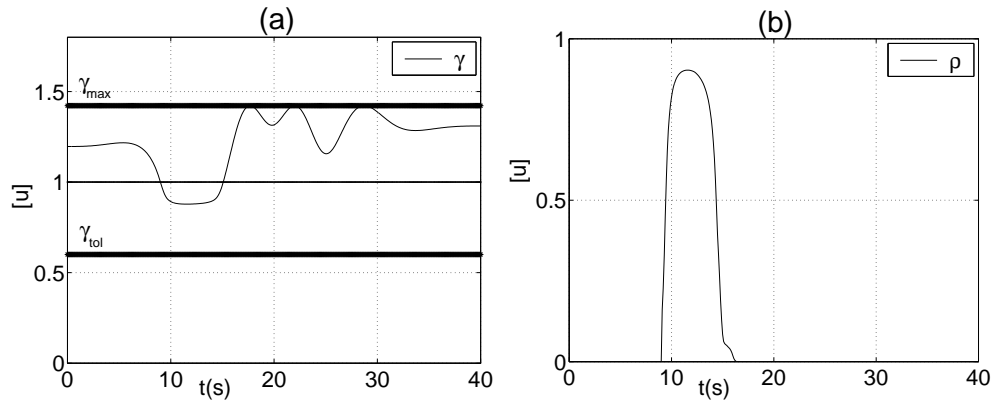


Figura 9.25: (a) histórico do desempenho  $\gamma$ , (b) ativação compacta

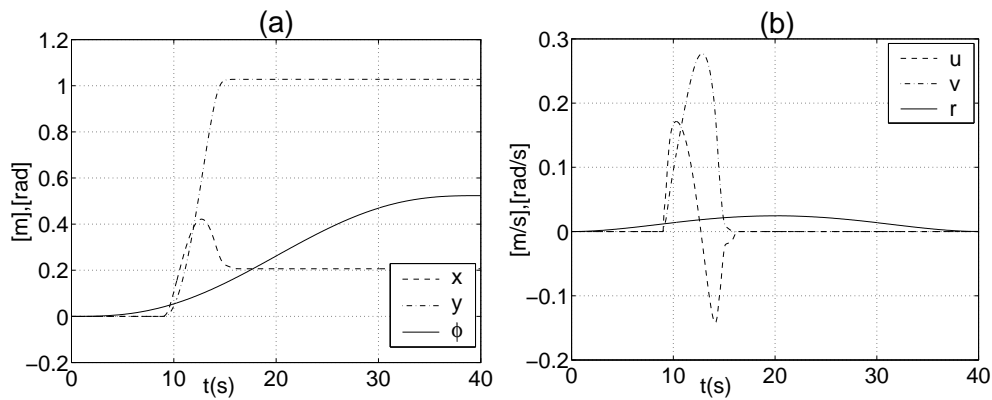


Figura 9.26: Arquitetura compacta: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo.

A Fig. 9.25 mostra a queda do desempenho e o perfil da ativação nebulosa híbrida, respectivamente. Enquanto isso, a Fig. 9.26 apresenta os valores de posição e velocidade do veículo. Percebe-se novamente a potencial aproximação entre os desempenhos da solução nebulosa híbrida e da Máquina Funcional Reativa.

#### 9.4.2.5 Arquitetura nebulosa híbrida projetiva

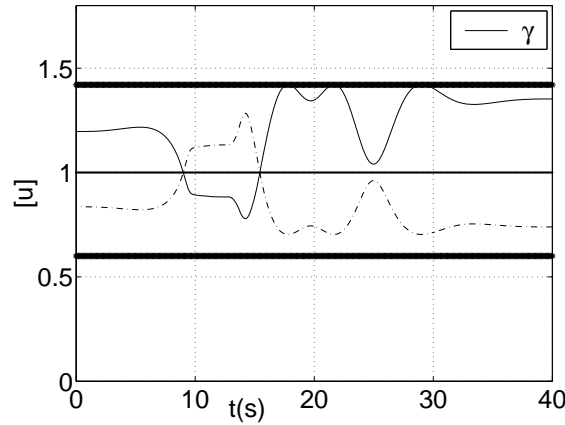


Figura 9.27: Histórico do desempenho  $\gamma$ .

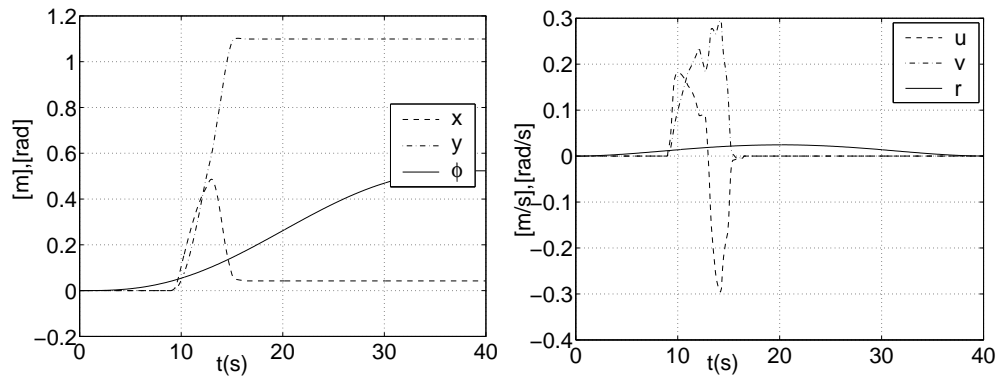


Figura 9.28: Arquitetura projetiva: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo.

As Figs. 9.27 e 9.28 apresentam comportamento próximo aos das abordagens IA anteriores.

Assim como observado na tarefa anterior, todas as técnicas propostas possuem uma flexibilidade que permite a imposição de movimento ao veículo durante o período de recuperação do desempenho. Além disso, fica evidente que os valores de desempenho, para estas técnicas de IA, apresentam valores mais seguros comparados com os métodos baseados em Pseudoinversa.

Entre as técnicas nebulosas híbridas, observa-se que a arquitetura compacta combina de

forma mais satisfatória simplicidade e flexibilidade, comparada às demais arquiteturas nebulosas híbridas. Entretanto, estas demais técnicas nebulosas permitem uma série de aperfeiçoamentos que abrangem o afastamento da singularidade e a amplitude da velocidade do veículo. Além disso, estas técnicas podem ser aplicadas na solução de outros compromissos de redundância, permitindo inclusive seu tratamento em paralelo.

Constata-se que para a simples Máquina Funcional Reativa aqui utilizada, apresentam-se valores de desempenho muito próximos aos obtidos com as técnicas nebulosas híbridas. Isto comprova o potencial desta técnica, que combina simplicidade computacional e a flexibilidade de técnicas mais sofisticadas a exemplo das baseadas em sistemas nebulosos.

Com o objetivo de tornar o SVMS mais robusto diante de posturas singulares, a próxima seção apresenta resultados de uma abordagem complementar, baseada na combinação entre uma das técnicas de IA e a teoria de sistemas híbridos.

## **9.5 Estratégia Híbrida aplicada ao SVMS: a cinemática híbrida como abordagem complementar.**

A estratégia Híbrida incorpora a técnica da Máquina Funcional complementada pelo formalismo de sistemas híbridos para evitar posturas singulares durante a operação do SVMS.

Através desta aplicação da cinemática híbrida, é possível identificar posturas singulares pelo índice de desempenho  $\gamma$ , o qual é supervisionado por uma autômato híbrido. Um dos estados discretos que compõem este autômato híbrido é conduzido por uma Máquina Funcional Reativa enquanto os outros estados conduzem a cinemática contida em cada um deles através de restrições ou de agentes reflexivos da respectiva cinemática ( $\alpha_i$ ).

A mudança entre os estados discretos provê um comportamento cinemático ao SVMS de forma que sejam evitadas singularidades.

Um dos modelos de autômato híbrido para evitamento de singularidades é apresentado na Fig. 9.29.

Neste caso, o conjunto de estados finitos é apresentado por  $L = \{l_0, l_1, l_2\}$ . Cada um destes

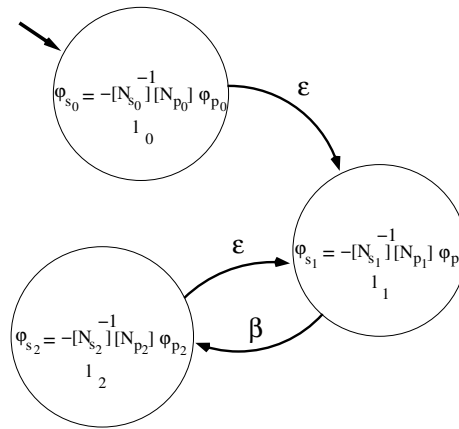


Figura 9.29: Sistema de evitamento de singularidades representado como um autômato híbrido  
estados contém os seguintes modelos:

- $l_0$  é o estado onde o movimento do veículo é imposto por uma Máquina Funcional Reativa;
- $l_1$  atua como um estado cinemático 3, onde as juntas que definem a posição do veículo (prismáticas) passam a se comportar como secundárias;
- $l_2$  é o estado onde o movimento do veículo é imposto por uma lei de interpolação polinomial que mantém a sua posição atual, por economia energética.

O conjunto finito de símbolos  $A$  é composto de  $\epsilon, \beta$ , onde suas respectivas *Guardas* definem,  $(\gamma < \gamma_{tol})$  e  $(\gamma = \gamma_{max})$  respectivamente.

### 9.5.1 Simulações

A tarefa definida para o efetuador deve seguir uma trajetória de comprimento  $3\pi r$  em um círculo deformado por uma senóide, onde  $r = 1,25m$ . Simultaneamente, o veículo deve alinhar-se com a direção da corrente em 0,78 rads, como destacado na Fig. 9.30. O passo de integração é de 2 ms, utilizando o método de Euler. A duração da simulação é de 60 segundos.

Ainda na Fig. 9.30, nota-se que o desempenho  $\gamma$  alcança valores abaixo da tolerância  $\gamma_{tol}$ , assim, ocorre a transição para o estado cinemático 3, onde o veículo passa a se mover de forma

secundária, i.e. as juntas que representam a posição do veículo passam as ser secundárias até que o desempenho  $\gamma$  recupere-se, alcançando valores acima do valor unitário ou máximo.

Quando este evento ocorre, o movimento do veículo retorna a condição primária, na qual é imposta uma restrição para manter a posição corrente através de uma lei interpolativa polinomial.

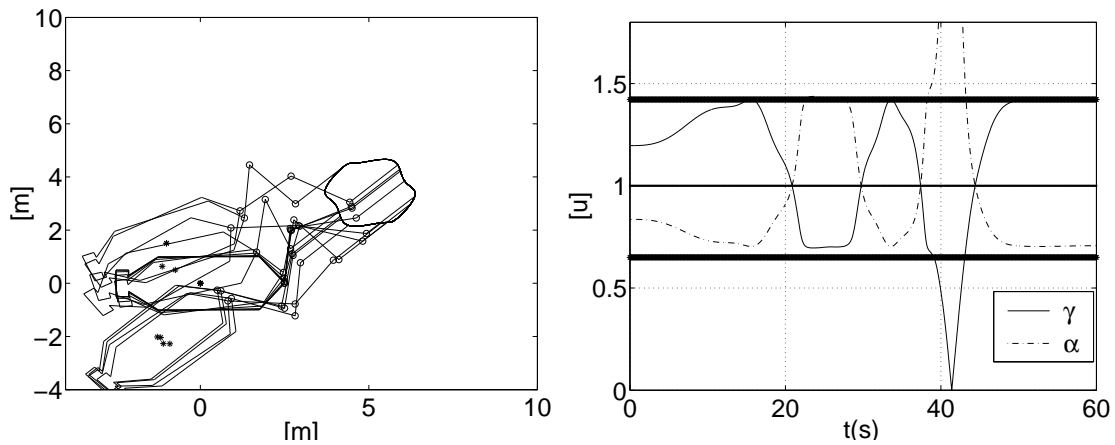


Figura 9.30: (a) visão planar da tarefa, (b) histórico do desempenho  $\gamma$

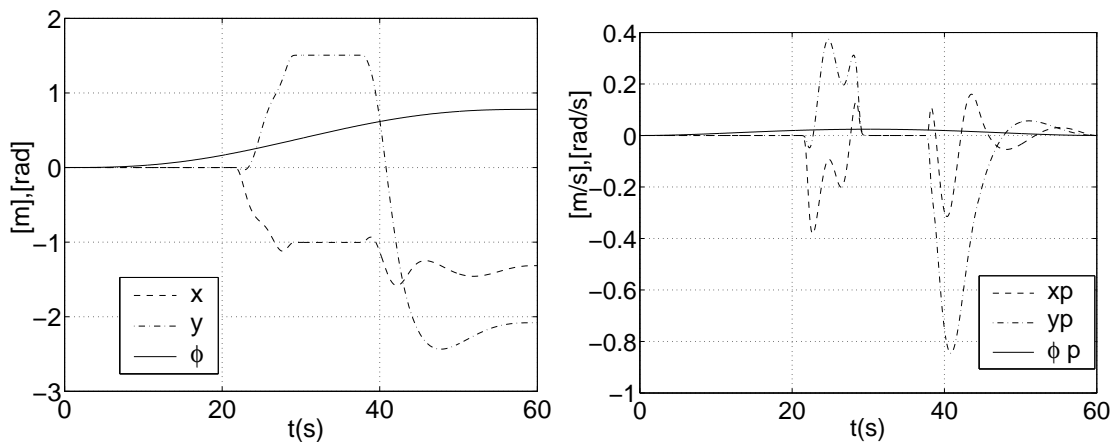


Figura 9.31: (a) posição do veículo, (b) velocidade do veículo

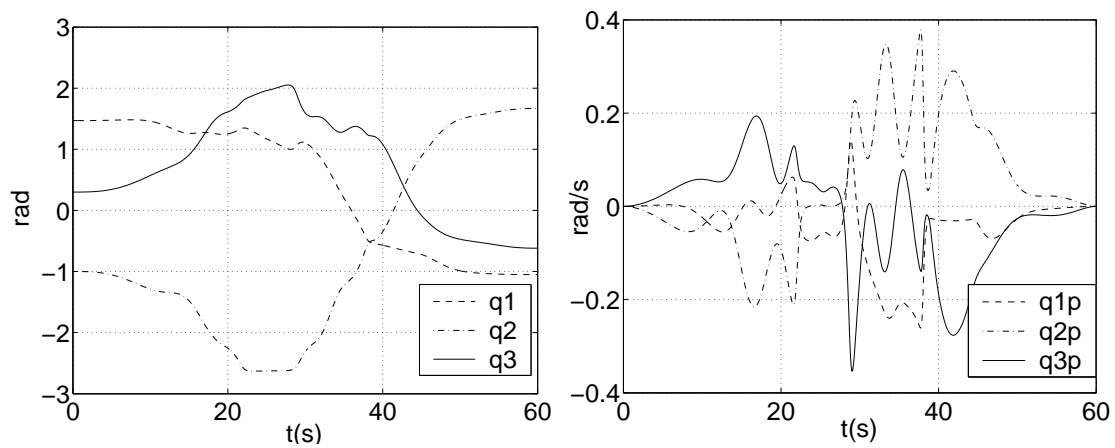


Figura 9.32: Manipulador: (a) posições das juntas, (b) velocidades das juntas

A Fig. 9.31 exibe a trajetória do veículo isenta de descontinuidades, enquanto a Fig. 9.32 mostra a junta do manipulador  $q_2$  atravessando a singularidade do estado cinemático original. Ainda na Fig. 9.32, nota-se que o movimento da junta não apresenta comportamento descontínuo.



## 9.6 Conclusões

As simulações anteriores mostram que em relação às técnicas tradicionais baseadas na Pseudoinversa, as técnicas baseadas em IA apresentam um melhor aproveitamento da redundância do SVMS, nas quais o movimento do veículo é solicitado apenas quando necessário. Nota-se que os valores destas técnicas apresentam resultados bastante semelhantes, diferindo ligeiramente em suas amplitudes.

A utilização da estratégia híbrida mostrou que a abordagem complementar entre técnicas de IA e a teoria de sistema híbridos desempenha de forma satisfatória o evitamento de singularidades durante operações complexas do SVMS.

# Capítulo 10

## Conclusões e Perspectivas

### 10.1 Conclusões

Esta tese apresentou a modelagem cinemática do SVMS utilizando o método de Davies de forma sistemática. A partir desta modelagem, propõe-se a solução da redundância do sistema utilizando o método das restrições cinemáticas. Este método consiste na composição de duas condições simultâneas baseadas em critérios energéticos: a primeira cancela o movimento translacional do veículo, enquanto a segunda realinha a orientação do veículo com a direção da corrente submarina.

Apesar do método das restrições cinemáticas resolver a questão energética, o mesmo limita o espaço de trabalho do SVMS apenas ao movimento do manipulador. Isto pode acarretar posturas singulares quando o movimento do manipulador não for suficiente para executar a dada tarefa. Portanto, o movimento do veículo torna-se necessário para evitar que tais posturas ocorram.

Para tanto, é necessário que ocorra uma coordenação entre os movimentos do veículo e do manipulador. Esta tese propõe uma forma conveniente de movimento. Esta conveniência está fundamentada em dois compromissos de controle. O primeiro estabelece que o movimento do veículo seja desenvolvido apenas quando necessário, i.e. habilita-se o movimento do veículo apenas quando o manipulador encontra-se próximo de posturas singulares, de outra forma, o veículo deve permanecer parado. O segundo compromisso estabelece que a atuação do veículo

seja realizada de forma a evitar discontinuidades nas velocidades do sistema, ou seja, o veículo deve começar e terminar seu ciclo de operação garantido a continuidade das velocidades de todo o sistema.

A satisfação destes compromissos motivou a aplicação de técnicas capazes de incorporar o conhecimento humano, como forma de garantir a coordenação do movimento do SVMS. Neste sentido, foram propostos fundamentos para concepção destas técnicas. Estes fundamentos estabelecem conceitos cinemáticos qualitativos baseados na teoria de sistemas elétricos de potência.

Foram propostas duas técnicas que utilizam recursos da inteligência artificial. A primeira delas define uma Máquina Funcional Reativa, onde ocorre uma combinação entre as áreas de conhecimento de sistemas elétricos de potência e agentes autônomos. A segunda técnica compartilha o formalismo dos sistemas nebulosos com a teoria dos autômatos finitos. Esta técnica é denominada de sistema nebuloso híbrido e implementada em três arquiteturas diferentes.

A abordagem das técnicas de IA é beneficiada nesta tese com um nível de abordagem hierarquicamente superior, que visa complementar estas técnicas utilizando a teoria de sistemas híbridos, quando o movimento do veículo não for eficiente no evitamento de singularidades. Esta abordagem utilizou o formalismo de autômatos híbridos, como forma de modelar o movimento de robôs redundantes por uma sequência de estados que evitam a singularidade. Resultados obtidos num exemplo de cadeia cinemática revelaram a potencialidade da metodologia e foi posteriormente confirmada num modelo de autômato híbrido aplicado ao SVMS.

## 10.2 Principais contribuições

Esta tese apresenta formas de configuração de algoritmos avançados em resolução de redundância de SVMS. As principais contribuições desta tese são:

- modelagem cinemática do SVMS com o método sistemático de Davies.
- novas propostas de quantificação e regulação do desempenho cinemático de sistemas robóticos redundantes.

- um programa funcional composto de agentes autônomos baseados em concepções Etológicas e sistemas elétricos de potência.
- nova aplicação de sistemas nebulosos auxiliados por autômatos finitos, concebendo sistemas nebulosos híbridos com diferentes interpretações.
- nova modelagem de evitamento de singularidades como um sistema híbrido, que pode ser aplicado a outros tipos de sistemas robóticos redundantes.
- estudo comparativo entre técnicas tradicionais baseadas em Pseudoinversa e as técnicas de IA propostas.

### 10.3 Perspectivas

O uso de sistemas robóticos avançados como sistemas veículo-manipulador submarinos está em crescimento emergente e a aplicação de algoritmos baseados em inteligência artificial é atrativa sob tais sistemas, pois são eficientes e robustos no tratamento de diversos problemas, na área de controle e em outras áreas.

Várias contribuições na solução da redundância de sistemas complexos como o SVMS ainda podem ser realizadas. Entre estas, considerado que este trabalho é restrito a casos planares, torna-se pertinente a implementação espacial das estratégias aqui desenvolvidas. Além disso, pode-se desenvolver uma técnica paralela, onde diferentes compromissos de redundância são considerados, como evitamento de singularidades e de colisões, e limite mecânico das juntas.

Adicionalmente, torna-se pertinente a implementação de soluções híbridas inteligentes que combinem redes neurais, sistemas nebulosos e algoritmos genéticos e sua posterior comparação com técnicas convencionais.

As questões de estabilidade são uma das mais importantes vertentes na análise de técnicas inteligentes, o que também estabelece sua pertinência em estudos futuros.

De acordo com a bibliografia, o estudo de sistemas híbridos ainda encontra-se na sua infância. Portanto, o aprimoramento dos primeiros resultados apresentados neste trabalho torna o estudo

de sistemas híbridos promissor na resolução de redundância de sistemas robóticos.

Potenciais exemplos de aprimoramento incluem: a incorporação de outras abordagens, outras formas de modelagem híbrida e estudo de estabilidade.

# Apêndice A

## Fundamentos Teóricos

Este capítulo apresenta o método de Davies formalizado por Campos [Campos, 2004] e utiliza-se este método para a modelagem de sistemas veículo-manipulador submarinos (*SVMS*).

### A.1 O método de Davies

#### A.1.1 Lei da circulação das malhas

A lei de circulação de Kirchhoff [Alexander and Sadiku, 2000, Desoer and Kuh, 1969] estabelece que a soma algébrica das diferenças de potencial ao longo de qualquer circuito elétrico é zero. Davies adapta a lei de circulação de Kirchhoff para resolver a cinemática diferencial de mecanismos de cadeia fechada.

Essa adaptação resulta na lei de circulação de Davies que estabelece: “A soma algébrica das velocidades relativas dos pares cinemáticos ao longo de qualquer cadeia cinemática fechada é zero” [Davies, 1981].

Usando esta lei, a relação entre as velocidades de uma cadeia cinemática fechada pode ser obtida no sentido de resolver a cinemática diferencial, como é apresentada no exemplo a seguir.

Seja um mecanismo de quatro barras da Fig. A.1 formada pelos elos 1, 2, 3 e 4 e pelas juntas rotativas  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$ , onde  $A$  é a junta externamente atuada.

Considere que o heligiro  $\$_A$  representa o movimento do elo 2 em relação ao elo 1,  $\$_B$  re-

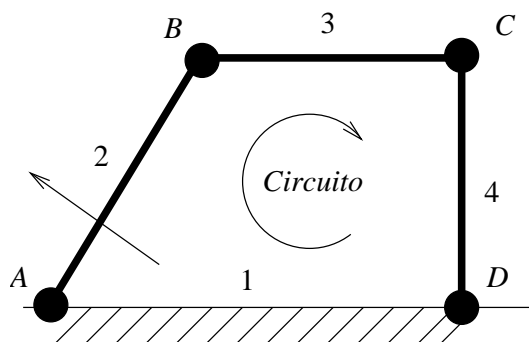


Figura A.1: Mecanismo de quatro barras

presenta o movimento do elo 3 em relação ao elo 2,  $\$C$  representa o movimento do elo 4 em relação ao elo 3 e  $\$D$  representa o movimento de elo 1 em relação ao elo 4. Assim, os heligiros  $\$A, \$B, \$C$  e  $\$D$  tem apenas três componentes uma vez que a velocidade linear  $V_p$  de qualquer ponto do mecanismo não tem a componente  $\mathcal{R}^*$  na direção do eixo  $Z$ .

Adicionalmente, a velocidade angular  $w$  de qualquer elo do mecanismo não tem as componentes  $\mathcal{L}$  e  $\mathcal{M}$  no plano  $XY$ . Desta forma, para um mecanismo de quatro barras no plano  $XY$ , as componentes dos heligiros são apenas  $\mathcal{N}, \mathcal{P}^*$  e  $\mathcal{Q}^*$ .

O mecanismo planar de quatro barras forma uma cadeia cinemática fechada. O movimento do elo 2 em relação ao elo 1 é descrito por  $\$A$ . O movimento do elo 3 em relação ao elo 1 pode ser dado por  $\$A + \$B$ . O movimento do elo 4 em relação ao elo 1 pode ser dado por  $\$A + \$B + \$C$  e o movimento do elo 1 em relação a si mesmo é  $\$A + \$B + \$C + \$D$ .

Os pares cinemáticos conectando o elo 1 a si mesmo formam uma cadeia cinemática fechada e a lei de circulação de Davies, de acordo com a orientação da Fig. A.1, é dada por

$$\$A + \$B + \$C + \$D = [0] \quad (\text{A.1})$$

onde  $[0]$  é um vetor zero com dimensão  $(3 \times 1)$ . Representando os heligiros através das suas respectivas magnitudes e helicóides normalizados, a Eq. (A.1) pode ser reescrita como

$$\hat{\$}_A \Psi_A + \hat{\$}_B \Psi_B + \hat{\$}_C \Psi_C + \hat{\$}_D \Psi_D = [0] \quad (\text{A.2})$$

onde  $\hat{\$}_A$  representa o heligiro normalizado de  $\$A$  e  $\Psi_A$  representa a magnitude da velocidade

(angular neste caso), similarmente para os pares cinemáticos  $B$ ,  $C$  e  $D$ .

A equação (A.2) é a equação de restrição do mecanismo de quatro barras e, em sua forma matricial pode ser dada por

$$\begin{bmatrix} \hat{\$}_A & \hat{\$}_B & \hat{\$}_C & \hat{\$}_D \end{bmatrix}_{(3 \times 4)} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_D \end{bmatrix}_{(4 \times 1)} = [0]_{(3 \times 1)} \quad (\text{A.3})$$

Como o mecanismo de quatro barras é planar, todos os heligiros são definidos por três helicóides independentes ou, em outras palavras, trata-se de um sistema de helicóides de terceira ordem [Hunt, 1987]. Adicionalmente, o mecanismo de quatro barras tem apenas um circuito independente ou laço nesta cadeia cinemática fechada.

Em geral a equação de restrição de um mecanismo com movimentos em um sistema de helicóides de ordem  $d$  e com  $l$  circuitos independentes pode ser escrito como

$$N_{dl \times F_b} \Psi_{F_b \times 1} = [0]_{(dl \times 1)} \quad (\text{A.4})$$

onde  $N$  é a matriz de rede contendo os helicóides normalizados,  $\Psi$  é o vetor das magnitudes,  $l$  é o número de circuitos independentes do mecanismo e  $F_b$  é o grau de liberdade bruto, isto é, a soma dos graus de liberdade de cada junta no mecanismo ( $F_b = \sum f_i$ ).

### A.1.2 Solução da cinemática no espaço das juntas

Cadeias cinemáticas fechadas, contém pares cinemáticos passivos adicionalmente aos pares cinemáticos ativos. A velocidade de um par cinemático ativo é dada por um atuador externo, por exemplo, um servomotor. As velocidades de um par cinemático passivo são funções das velocidades dos pares cinemáticos ativos devido ao fechamento da cadeia.

Usando a equação de restrição, Eq.(A.3), podem-se calcular as velocidades das juntas passivas em função das velocidades das juntas ativas. Este procedimento é referido como a solução cinemática no espaço das juntas.



Para garantir esta solução, a equação de restrição deve ser rearranjada separando os pares cinemáticos passivos e ativos.

A Eq.(A.3) estabelece  $dl$  restrições para uma cadeia cinemática com  $F_b \leq dl$  variáveis; desta forma, existem  $F_N \leq F_b$  variáveis independentes na equação de restrição, ou seja,

$$F_N = F_b - dl \quad (A.5)$$

onde  $F_N$  é o grau de liberdade ou mobilidade da cadeia cinemática. O grau de liberdade da cadeia  $F_N$  é também o número de variáveis necessárias para descrever todos os movimentos do mecanismo quando todos os pares cinemáticos são considerados.

O vetor das magnitudes  $\Psi$  pode ser dividido em  $dl$  magnitudes secundárias ou desconhecidas  $\Psi_s$  e  $F_N$  magnitudes primárias ou conhecidas  $\Psi_p$ , isto é,  $\Psi = [\Psi_s; \Psi_p]^T$ . Rearranjando a matriz de malhas  $[N]_{(dl \times F_b)}$  coerentemente com a divisão de suas magnitudes, tem-se  $[N]_{(dl \times F_b)} = [[N_s]_{(dl \times dl)}; [N_p]_{(dl \times F_N)}]$ , onde a sub-matriz de rede secundária  $[N_s]_{(dl \times dl)}$  corresponde às juntas secundárias e a sub-matriz de rede primária  $[N_p]_{(dl \times F_N)}$  corresponde às juntas primárias. Desta forma, rearranjando a Eq. (A.3), tem-se

$$\begin{bmatrix} [N_s]_{(dl \times dl)} \\ [N_p]_{(dl \times F_N)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Psi_s]_{(dl \times 1)} \\ \dots \\ [\Psi_p]_{(F_N \times 1)} \end{bmatrix} = [0]_{(m \times 1)} \quad (A.6)$$

Esta equação é a equação de restrição rearranjada para a obtenção da solução da cinemática no espaço das juntas e pode ser reescrita como

$$N_s \Psi_s = -N_p \Psi_p \quad (A.7)$$

ou

$$\Psi_s = -N_s^{-1} N_p \Psi_p \quad (A.8)$$

A Eq.(A.8) possibilita obter as magnitudes dos pares cinemáticos secundários em função dos pares cinemáticos primários sempre que a matriz  $N_s$  tiver inversa. Ou seja, a Eq. (A.8) é a

solução da cinemática no espaço de juntas.

O mecanismo de quatro barras (Fig. A.1) é planar ( $d = 3$ ), contém um circuito independente ( $l = 1$ ) e quatro juntas, cada uma com um grau de liberdade ( $F_b = 4$ ). O grau de liberdade da cadeia de um mecanismo de quatro barras é  $F_N = F_b - dl = 4 - 3 \cdot 1 = 1$ . Considere que o par  $A$  é um par cinemático atuado (primário) e que as juntas  $B$ ,  $C$  e  $D$  são pares cinemáticos não-atuados (secundários). Assim, a magnitude da velocidade  $\Psi_A$  é determinada por um atuador externo e as magnitudes das velocidades dos pares cinemáticos passivos,  $\Psi_B$ ,  $\Psi_C$  e  $\Psi_D$ , são funções da magnitude  $\Psi_A$ .

Rearranjando a Eq. (A.8), a submatriz de rede primária resulta em  $N_p = [\hat{\$}_A]$  e a submatriz secundária é  $N_s = [\hat{\$}_B \ \hat{\$}_C \ \hat{\$}_D]$ . Se  $N_s$  é inversível, a magnitude das velocidades dos pares secundários  $\Psi_s$  são calculados por

$$\begin{bmatrix} \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_D \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \hat{\$}_B & \hat{\$}_C & \hat{\$}_D \end{bmatrix}^{-1} [\hat{\$}_A] \Psi_A \quad (\text{A.9})$$

a qual é a solução cinemática no espaço das juntas para um mecanismo de quatro barras.

## A.2 O conceito de cadeia cinemática virtual

A cadeia cinemática virtual, cadeia virtual para resumir, é essencialmente uma ferramenta para obter informações sobre o movimento de uma cadeia cinemática ou impor movimentos à uma cadeia cinemática.

Além de monitorar os movimentos, as cadeias virtuais podem ser virtualmente atuadas, por exemplo, para evitar problemas cinemáticos tais como colisões e singularidades.

Dada uma cadeia cinemática pode-se obter informações acerca do seu movimento ou introduzir características a seu movimento utilizando *cadeias cinemáticas virtuais* adicionadas à cadeia cinemática do mecanismo ou manipulador, denominada cadeia cinemática *real*.

Para tanto estas cadeias cinemáticas virtuais precisam possuir as seguintes propriedades:

- A cadeia virtual é uma cadeia cinemática serial aberta, composta por elos e juntas, denominados *elos virtuais* e *juntas virtuais*;
- Os heligiros que representam o movimento das juntas virtuais são *linearmente independentes*;
- A cadeia virtual não altera a mobilidade da cadeia cinemática real.

Como consequência, o grau de liberdade da cadeia virtual deve ser igual à ordem do sistema de helicóides ao qual pertence a cadeia cinemática real.

Quando as juntas virtuais tem apenas um grau de liberdade, o número de juntas virtuais é igual à ordem  $d$  do sistema de helicóides. Por outro lado, se a cadeia virtual contém juntas com mais de um grau de liberdade, ou seja  $f > 1$ , estas juntas podem ser substituídas instantaneamente por  $f$  juntas de um grau de liberdade em série.

Usando heligiros pode-se selecionar diferentes sistemas de coordenadas para representar o movimento entre corpos. Assim, é possível representar os movimentos das juntas virtuais em um sistema de coordenadas conveniente para obter heligiros mais simples. O elo onde um sistema de coordenadas é fixo e denominado *elo de suporte* do sistema de coordenadas.

As cadeias virtuais são utilizadas para obter informações ou introduzir características relativas ao movimento das cadeias cinemáticas. A escolha da cadeia virtual depende das informações que se desejam obter ou introduzir entre os dois elos da cadeia cinemática aos quais a cadeia virtual é conectada.

Para facilitar a visualização do emprego de cadeias cinemáticas virtuais aos *SVMs*, a próxima seção apresenta uma representação abstrata de cadeias cinemáticas fechadas por meio de grafos.

### A.3 Representação da Cadeia Cinemática por Grafos

Esta seção apresenta um forma de representação abstrata de cadeias cinemáticas fechadas por meio de grafos. Esta representação auxilia a visualização da construção da equação de restrição

para cadeias cinemáticas. Adicionalmente, a equação de restrição é obtida sistematicamente através da matriz de incidência do grafo da cadeia [Campos, 2004]. Para tanto, antes de expor um exemplo de aplicação, alguns conceitos são apresentados.

### A.3.1 Conceitos básicos

O grafo é um sistema de linhas interconectados por meio de nós.

Seja uma cadeia cinemática constituída de elos com movimento relativo entre si conectados por juntas [Davies, 1981]. Adicionalmente, uma cadeia cinemática *fechada* contém uma ou mais *malhas* de elos e juntas.

O grafo de uma cadeia cinemática fechada é uma ferramenta para obter mais facilmente a relação entre as velocidades das juntas pertencentes a uma malha. O conjunto de tais relações, uma para cada malha, é denominada *equação de restrição* da cadeia cinemática.

De acordo com [Campos, 2004], neste trabalho utilizam-se as noções de *grafo de acoplamento* e de *grafo de movimento*. O grafo de acoplamento  $G_C$  de uma cadeia cinemática representa cada elo da cadeia por meio de um *nó*, identificado por um número, e cada junta por meio de uma *aresta*, identificada por uma letra. Seja  $n$  o número total de nós e  $e$  o número total de arestas.

Os nós são ligados por arestas. Se as arestas de um grafo são orientadas, as arestas são chamadas *arcos* e o grafo é denominado *digrafo* (grafo direcionado). Um arco representa a velocidade relativa entre dois elos.

O digrafo de movimento  $G_M$  descreve o grau de liberdade de cada junta da cadeia. No digrafo de movimento  $G_M$ , as arestas representam somente juntas que permitem um grau de liberdade. O digrafo de movimento é construído trocando cada junta original por uma ou mais juntas substitutas de um grau de liberdade. Assim, considerando  $f$  o número de graus de liberdade de cada junta, cada um dos arcos de  $G_C$  é substituída por  $f$  arestas em  $G_M$ . Os arcos substitutos são colocados em série e com o mesmo sentido do arco original. Entre as arestas substitutas aparecem  $f - 1$  nós (elos) virtuais com o objetivo de mediar os  $f$  arcos (juntas) substitutos [Davies, 1981].

Cada conjunto de  $f$  arcos de  $G_M$ , que representam um arco de  $G_C$ , define o movimento de

um par cinemático original. Cada um dos  $f$  arcos destes conjuntos define um movimento simples (um grau de liberdade). Tais movimentos, em conjunto, determinam o movimento permitido pelo par cinemático original, representado pelo arco do digrafo  $G_C$ .

Seja o grau de liberdade *bruto* da cadeia cinemática  $F_b$  o somatório dos graus de liberdade de todas as juntas da cadeia. Assim, o número de arcos de  $G_M$  indica o grau de liberdade bruto  $F_b$  da cadeia cinemática. Todos os  $F_b$  heligios da cadeia são gerados por  $d$  heligios linearmente independentes, onde  $d$  ( $1 \leq d \leq 6$ ) é a ordem mínima do sistema de helicóides.

O digrafo de movimento  $G_M$  permite visualizar facilmente as malhas da cadeia.

A equação de restrição é facilmente estabelecida para cadeias de múltiplas malhas utilizando a matriz de *incidência* da teoria de grafos, como é apresentado na seqüência.

Os digrafos de acoplamento e de movimento de uma cadeia cinemática podem ser representados por meio de *matrizes de incidência* as quais indicam a presença dos arcos em cada percurso fechado do digrafo. As matrizes incidência chamadas aqui *matrizes de malhas* são usadas por Davies [Davies, 1981] para facilitar a extensão do seu método a cadeias com malhas múltiplas.

O digrafo de movimento  $G_M$  pode ser representado pela matriz de malhas  $B_{(l \times e)}$ , onde  $l$  indica o número de malhas (linhas de  $B$ ) e  $e$  é o número de arcos (colunas de  $B$ ). Cada elemento ( $b_{ij}$ ) of  $B_{(l \times e)}$  é:

- 0, se a malha  $i$  não inclui o arco  $j$ ,
- +1, se a orientação da malha  $i$  coincide com a orientação do arco  $j$ ,
- -1, se a orientação da malha  $i$  e a orientação do arco  $j$  são opostas.

A matriz de malhas  $B$  é usada para obter a equação de restrição da cadeia de múltiplas malhas de forma sistemática.

Seja  $B_{i(F_b \times F_b)}$ ,  $i = 1, 2, \dots, l$  uma matriz diagonal cujos elementos não nulos são os elementos da linha  $i$  da matriz  $B$ . Seja  $D$  a matriz de helicóides *diretos* que contém os helicóides normalizados correspondentes a todos os arcos de  $G_M$ .

Assim, a matriz de rede  $N$  da equação de restrição é obtida por [Davies, 1981]:

$$N_{(dl \times F_b)} = \begin{bmatrix} DB_1 \\ DB_2 \\ DB_3 \\ \dots \\ DB_l \end{bmatrix}_{(dl \times F_b)} \quad (\text{A.10})$$

A equação A.10 estabelece a matriz de rede  $N$  para qualquer cadeia cinemática fechada, consequentemente, facilita a montagem da equação de restrição para cadeias com múltiplas malhas

$$N_{dl \times F_b} \Psi_{F_b \times 1} = 0 \quad (\text{A.11})$$

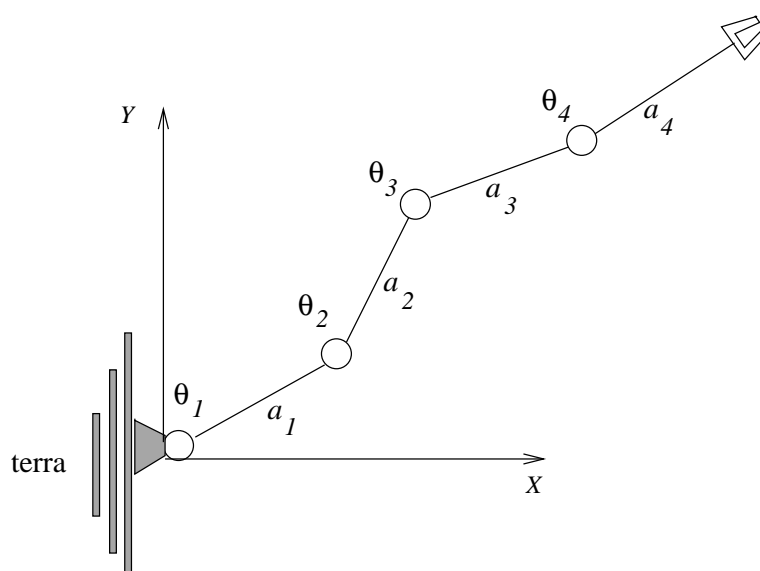
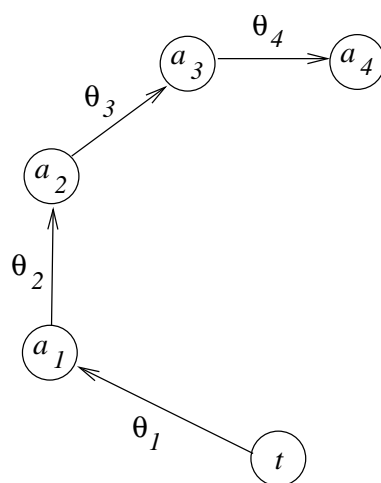
Cabe observar que todos os heligiros da equação de restrição devem ser expressos no mesmo sistema de coordenadas. Para este propósito é útil a transformação de coordenadas de helicóide do capítulo 2. Para esclarecer os fundamentos aqui apresentados, a próxima seção apresenta um exemplo de aplicação da teoria de grafos aplicada a um robô redundante  $RRRR$ , usado em [dos Santos, 2003a].

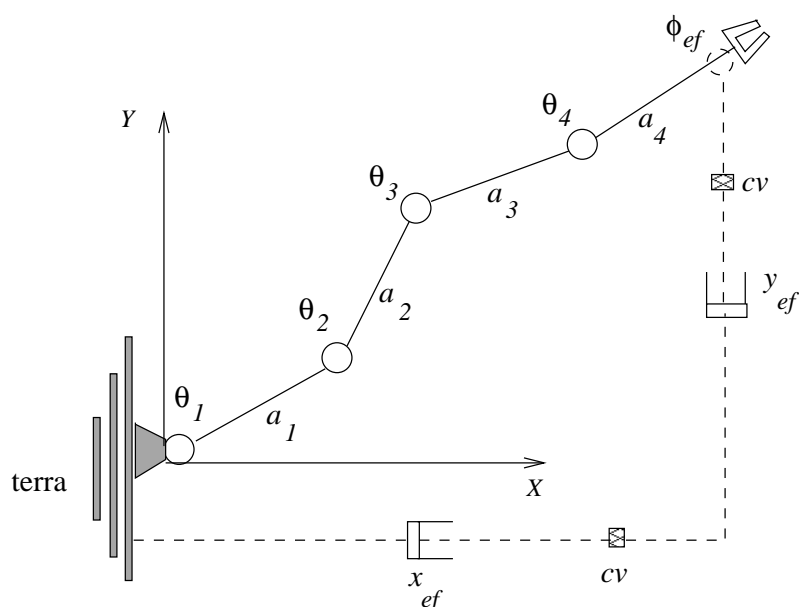
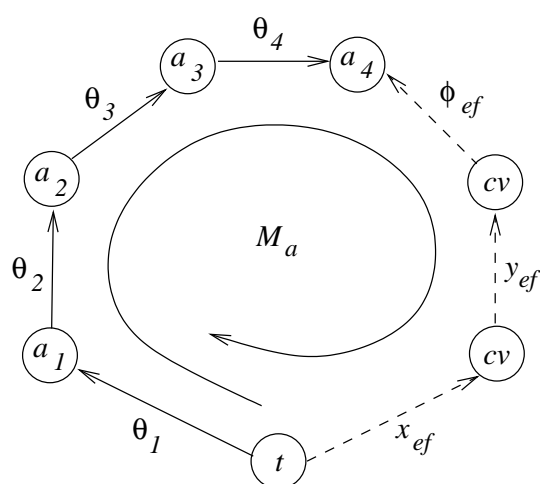
### A.3.2 Exemplo de aplicação ao robô $RRRR$

Considere, por exemplo, a cadeia cinemática do manipulador serial plano  $RRRR$  com quatro juntas rotativas  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$  mostrado na Fig.(A.2). Os digrafos de acoplamento  $G_C$  e de movimento  $G_M$  desta cadeia cinemática, mostrados na Fig.(A.3), são iguais pois o manipulador apresenta juntas com apenas um grau de liberdade.

Para obter ou introduzir informações relativas ao movimento do efetuador em relação à base adiciona-se uma cadeia virtual entre a base e o efetuador. Neste exemplo, essas informações são fornecidas em coordenadas cartesianas, assim escolhe-se a cadeia virtual  $PPR$ , onde as juntas desta cadeia virtual são ligadas por corpos virtuais ( $cv$ ). A cadeia modificada resultante  $RRRR + PPR$  é mostrada na Fig.A.4. Os digrafos  $G_C$  e  $G_M$  desta cadeia modificada são iguais, pois não existem juntas com mais de um grau de liberdade na cadeia modificada, veja a Fig.A.5.

A matriz de helicóides diretos  $D$  e a matriz de malhas  $B$  da cadeia modificada são formadas

Figura A.2: Manipulador serial plano  $RRRR$ Figura A.3: Digrafo  $G_C/G_M$  do manipulador serial plano  $RRRR$

Figura A.4: Cadeia cinemática  $RRRR + PPR$ Figura A.5: Digrafo  $G_C/G_M$  da cadeia  $RRRR + PPR$



com base no digrafo de movimento  $G_M$  da Fig.A.5. A matriz  $D$  de helicóides diretos da cadeia modificada é

$$D = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{\theta_1} & \hat{\$}_{\theta_2} & \hat{\$}_{\theta_3} & \hat{\$}_{\theta_4} & \hat{\$}_{x_{ef}} & \hat{\$}_{y_{ef}} & \hat{\$}_{\phi_{ef}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

onde todos os helicóides normalizados da cadeia cinemática modificada devem estar representados em um mesmo sistema de coordenadas.

Com base no sentido da malha  $M_a$  do digrafo  $G_M$  a matriz de malhas  $B$  é

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} M_a \quad (\text{A.13})$$

e, desta forma a matriz diagonal  $B_1$  definida na seção anterior resulta em,

$$B_1 = \text{diag} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{A.14})$$

Portanto, através da Eq. (A.10), a matriz de rede da cadeia modificada  $M_a$  é

$$M_a = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{\theta_1} & \hat{\$}_{\theta_2} & \hat{\$}_{\theta_3} & \hat{\$}_{\theta_4} & -\hat{\$}_{x_{ef}} & -\hat{\$}_{y_{ef}} & -\hat{\$}_{\phi_{ef}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

O vetor das magnitudes dos heligiros  $\Psi$  é formado pela magnitude da velocidade de cada junta da cadeia modificada

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_{\theta_1} & \Psi_{\theta_2} & \Psi_{\theta_3} & \Psi_{\theta_4} & \Psi_{x_{ef}} & \Psi_{y_{ef}} & \Psi_{\phi_{ef}} \end{bmatrix}^T \quad (\text{A.16})$$

Assim, de acordo com a Eq. (A.11), a equação de restrição da cadeia modificada  $RRRR + PPR$  é

$$\begin{bmatrix} \hat{\$}_{\theta_1} & \hat{\$}_{\theta_2} & \hat{\$}_{\theta_3} & \hat{\$}_{\theta_4} & -\hat{\$}_{x_{ef}} & -\hat{\$}_{y_{ef}} & -\hat{\$}_{\phi_{ef}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{\theta_1} \\ \Psi_{\theta_2} \\ \Psi_{\theta_3} \\ \Psi_{\theta_4} \\ \Psi_{x_{ef}} \\ \Psi_{y_{ef}} \\ \Psi_{\phi_{ef}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

O método de Davies para estabelecer a equação de restrição de cadeias cinemáticas também se aplica a cadeias no espaço tridimensional como é mostrado através do exemplo aplicado ao *SVMs* no capítulo 4.

## Apêndice B

### Modelagem cinemática convencional

O sistema veículo-manipulador submarino possui um manipulador de base móvel, ou seja, a posição e a orientação do efetuador final depende da configuração do veículo. Assim, nesta seção é apresentada a formulação da cinemática diferencial do sistema veículo-manipulador subaquático, a qual representa as velocidades lineares e angulares do efetuador final em função dos movimentos provocados pelo veículo e pelas juntas do manipulador. Observa-se na Fig. B.1 que o sistema é descrito através de quatro sistemas de coordenadas: o sistema inercial  $(x_t, y_t, z_t)$ ; o sistema do veículo  $(x_v, y_v, z_v)$ , cuja origem é usualmente posicionada no centro de gravidade e os eixos coordenados coincidindo com os eixos principais de inércia [Fossen, 1998]; o sistema da base do manipulador  $(x_b, y_b, z_b)$ ; e o sistema de coordenadas do efetuador final  $(x_e, y_e, z_e)$ .

#### B.0.2.1 Análise de posição

Baseado numa simples análise geométrica da Fig. B.1, a posição do sistema de referência do efetuador final em relação ao sistema de referência inercial é dada por,

$$x_e^t = x_v^t + R_{tv}x_e^v. \quad (\text{B.1})$$

onde:

- $x_v^t$  = posição do veículo em relação ao sistema de referência inercial;

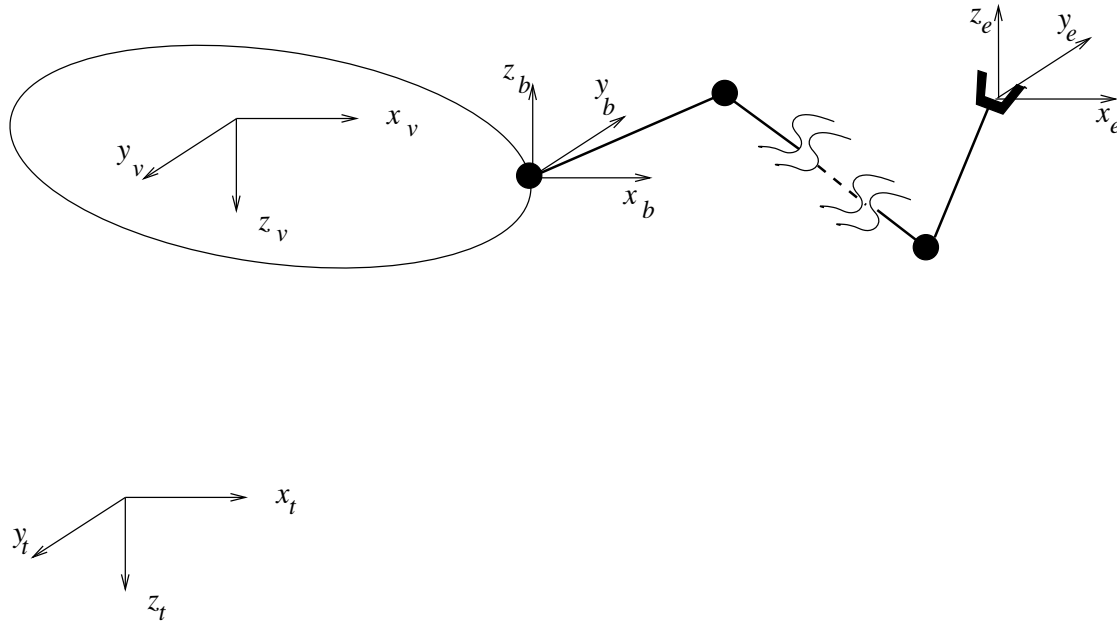


Figura B.1: Sistema veículo-manipulador submarino.

- $R_{tv}$  = orientação do veículo em relação ao sistema de referência inercial;
- $x_e^v$  = posição do efetuador final em relação ao sistema de referência do veículo.

Assim, a Eq. B.1 representa a transformação de coordenadas (translação + rotação) entre os sistemas do efetuador final e inercial. Ainda observando a Eq. B.1, a posição do efetuador final em relação ao sistema de referência do veículo ( $x_e^v$ ) é formulada de forma similar:

$$x_e^v = x_b^v + R_{vb}x_e^b \quad (\text{B.2})$$

onde:

- $x_b^v$  = posição da base do manipulador em relação ao sistema de referência do veículo;
- $R_{vb}$  = orientação da base do manipulador em relação ao sistema de referência veículo;
- $x_e^b$  = posição do efetuador final em relação ao sistema de referência da base do manipulador.

Substituindo a Eq. B.2 em B.1, tem-se que:

$$x_e^t = x_v^t + R_{tv}(x_b^v + R_{vb}x_e^b). \quad (\text{B.3})$$

Diferenciando a Eq. B.3:

$$\dot{x}_e^t = \dot{x}_v^t + \dot{R}_{tv}(x_b^v + R_{vb}x_e^b) + R_{tv}(\dot{x}_b^v + \dot{R}_{vb}x_e^b + R_{vb}\dot{x}_e^b). \quad (\text{B.4})$$

Considerando que o sistema da base é fixo em relação ao sistema do veículo (i.e.,  $\dot{x}_b^v = 0$ ,  $\dot{R}_{vb} = 0$ ) e  $\dot{R}_{tv} = w_v \times R_{tv}$ , onde  $w_v$  é a velocidade angular do veículo no sistema inercial, tem-se

$$\dot{x}_e^t = \dot{x}_v^t + w_v \times (R_{tv}x_e^v) + R_{tb}\dot{x}_e^v. \quad (\text{B.5})$$

Usando a propriedade da matriz anti-simétrica ( $x \times y = \mathcal{S}(x)y = -\mathcal{S}(y)x$ ):

$$\dot{x}_e^t = \dot{x}_v^t - \mathcal{S}(R_{tv}x_e^v)w_v + R_{tb}\dot{x}_e^v. \quad (\text{B.6})$$

Admitindo que a relação entre velocidade do efetuador final,  $\dot{x}_e^b$ , e a velocidade das juntas  $\dot{q}$  é dada pelo Jacobiano do manipulador  $\dot{x}_e^b = J_p(q)\dot{q}$ , onde  $J_p(q) \in \mathbb{R}^{n \times 3}$  [Rojas et al., 2000], a equação B.6 pode ser reescrita na seguinte forma matricial:

$$\dot{x}_e^t = \begin{bmatrix} I & -\mathcal{S}(R_{tv}x_e^v) & R_{tb}J_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_v^t \\ w_v \\ \dot{q} \end{bmatrix}. \quad (\text{B.7})$$

A Eq. B.7 representa a relação entre a velocidade linear do efetuador final ( $\dot{x}_e^t$ ) e as contribuições das velocidades das juntas do manipulador ( $\dot{q}$ ) e do movimento do veículo ( $\dot{x}_v^t$ ,  $w_v$ ) no sistema referencial do veículo.

### B.0.2.2 Análise de orientação

A velocidade angular do sistema de referência do efetuador final em relação ao sistema de referência inercial é dada por:

$$w_e = w_v + R_{tb}J_o\dot{q}, \quad (\text{B.8})$$

onde:

- $w_v$  = velocidade angular do veículo;
- $R_{tb}$  = rotação da base do manipulador em relação ao sistema de referência inercial;
- $J_o$  = Jacobiano de orientação do efetuador final em relação ao sistema de referência da base do manipulador.

Por fim, a Eq. B.8 pode ser reescrita na seguinte forma matricial:

$$w_e = \begin{bmatrix} 0 & I & R_{tb}J_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_v^t \\ w_v \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (\text{B.9})$$

### B.0.2.3 Jacobiano geométrico

De acordo com a formulação da cinemática diferencial, o mapeamento entre as velocidades do efetuador final e das juntas é realizado por um Jacobiano geométrico. Assim, as Eqs. B.7 e B.9 são agrupadas,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e^t \\ w_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & -\mathcal{S}(R_{tv}x_e^v) & R_{tb}J_p \\ 0 & I & R_{tb}J_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_v^t \\ w_v \\ \dot{q} \end{bmatrix}. \quad (\text{B.10})$$

Finalmente, obedecendo as notações estabelecidas pelo SNAME [SNAME, 1950], a Eq. B.10 é reescrita na seguinte forma compacta.

$$\dot{x}_E = J_E(\eta, q)\zeta, \quad (\text{B.11})$$

onde:  $\dot{x}_E = [(\dot{x}_e^t)^T w_e^T]^T$ , é o vetor das velocidades do efetuador final expressa no sistema de referência inercial;  $\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \in \mathbb{R}^6$ , é o vetor de posição do veículo e dos ângulos aeronáuticos no sistema de referência inercial;  $q \in \mathbb{R}^n$  é o vetor das variáveis das juntas do manipulador,  $n$  é o número de juntas e o vetor  $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$  é a derivada temporal correspondente;  $\zeta = [\nu^T \dot{q}^T]^T$ ,  $\nu \in \mathbb{R}^6$  é o vetor das velocidades lineares e angulares do veículo expressas no sistema de referência do veículo. O mapeamento que relaciona o vetor de velocidades  $\zeta$  de dimensão  $(6 + n)$  com o vetor de velocidades do efetuador final  $\dot{x}_E$  de dimensão  $m$  é realizado através da matriz jacobiana  $J_E(\eta, q)$  de dimensão  $m \times (6 + n)$ .

## B.1 Veículo-Manipulador planar

Nesta seção é desenvolvida uma modelagem do sistema veículo-manipulador reduzido ao plano xy, que tem o objetivo de servir como exemplo para futuras implementações de estratégias de controle cinemático. O sistema abordado possui um manipulador com três juntas rotacionais, totalizando seis graus de liberdade (vide figura B.2). Dos quais, três são caracterizados pelas coordenadas do veículo  $(x, y, \psi)$ . Para efeito de simplificação durante a modelagem planar, a Eq. B.10 recebe a seguinte notação.

$$\begin{aligned} A &= -\mathcal{S}(R_{tv}x_e^v) \\ B &= R_{tb}J_p \\ C &= R_{tb}J_o, \end{aligned} \quad (\text{B.12})$$

onde os componentes são destacados a seguir:

$$R_{tv} = R_{tb} = \begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ s\phi & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{B.13})$$

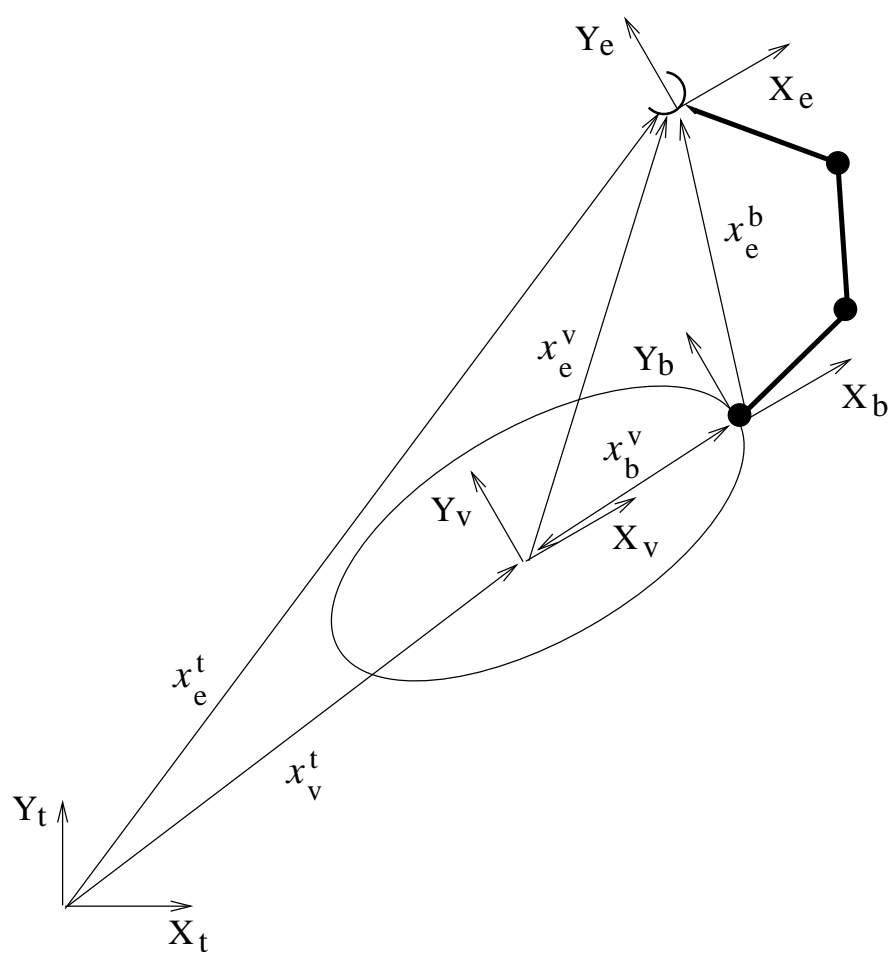


Figura B.2: Diagrama cinemático do sistema veículo-manipulador planar.



$$J_p = \begin{bmatrix} (-a_1 s_1 - a_2 s_{12} - a_3 s_{123}) & (-a_2 s_{12} - a_3 s_{123}) & -a_3 s_{123} \\ (a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_3 c_{123}) & (a_2 c_{12} + a_3 c_{123}) & a_3 c_{123} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (\text{B.14})$$

$$J_o = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{B.15})$$

$$x_e^v(q) = \begin{bmatrix} a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_3 c_{123} + x_b^v \\ a_1 s_1 + a_2 s_{12} + a_3 s_{123} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (\text{B.16})$$

$$-\mathcal{S}(x) = \begin{bmatrix} 0 & x_3 & -x_2 \\ -x_3 & 0 & x_1 \\ x_2 & -x_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.17})$$

Assim, com o objetivo de expressar o processo de redução do sistema espacial para o caso planar, expande-se a Eq. B.10

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{z}_e \\ \dot{\theta}_e \\ \dot{\phi}_e \\ \dot{\psi}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ 0 & 1 & 0 & A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ 0 & 0 & 1 & A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (\text{B.18})$$

De acordo com o plano de aplicação, neste caso o plano xy, elimina-se a terceira linha do jacobiano. Além disso, a orientação do efetuador final neste plano é caracterizada apenas pela rotação em relação ao eixo perpendicular ao plano, ou seja  $\psi$ , o que corresponde a eliminação da quarta e quinta linhas. Assim, tem-se a seguinte formulação:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\psi}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ 0 & 1 & 0 & A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.19})$$

Considera-se que as coordenadas  $z$ ,  $\theta$  e  $\phi$  do veículo sejam constantes. Adicionalmente, devido à economia de energia nos propulsores em relação à direção da corrente oceânica [Antonelli and Chiaverini, 1998], a tarefa que o efetuador realiza também depende da orientação do veículo  $\psi_v$ . Portanto, obtém-se a representação do sistema robótico veículo-manipulador submarino no plano xy:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\psi}_e \\ \dot{\psi}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ 0 & 1 & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ 0 & 0 & 1 & C_{31} & C_{32} & C_{33} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (\text{B.20})$$

onde:

$$\begin{aligned}
A_{13} &= -(x_b^v s_\psi + a_1 s_{1\psi} + a_2 s_{12\psi} + a_3 s_{123\psi}) \\
A_{23} &= x_b^v c_\psi + a_1 c_{1\psi} + a_2 c_{12\psi} + a_3 c_{123\psi} \\
B_{11} &= -(a_1 c_{1\psi} + a_2 c_{12\psi} + a_3 c_{123\psi}) \\
B_{12} &= -(a_2 s_{12\psi} + a_3 s_{123\psi}) \\
B_{13} &= -a_3 s_{123\psi} \\
B_{21} &= a_1 c_{1\psi} + a_2 c_{12\psi} + a_3 c_{123\psi} \\
B_{22} &= a_2 c_{12\psi} + a_3 c_{123\psi} \\
B_{23} &= a_3 c_{123\psi} \\
C_{31} &= C_{32} = C_{33} = 1.
\end{aligned} \tag{B.21}$$

A Eq. B.20 expressa claramente a redundância do veículo, pois o número de colunas supera o de linhas, ou seja, o número de juntas do sistema robótico excede a dimensão do espaço de trabalho. Portanto, o cálculo da cinemática inversa do sistema pode induzir a aplicação de algumas estratégias típicas de controle cinemático baseadas na formulação da matriz pseudo-inversa. Todavia, a obtenção da matriz pseudo-inversa implica um cálculo que mistura dimensões diferentes, ou seja, os deslocamentos nas juntas prismáticas são fornecidos em metros, enquanto os deslocamentos das juntas rotativas são fornecidos em radianos [Downing, 2002].

## Apêndice C

# Modelagem de um Sistema Veículo-Manipulador Submarino planar usando o método de Davies

No sentido de simplificar as implementações computacionais posteriores, esta seção tem o objetivo de restringir-se aos casos de tarefas planares descritas no plano do manipulador do *SVMS*, o qual é montado horizontalmente. A Fig. C.1 exibe um *SVMS* com seis graus de liberdade, os quais são caracterizados por três coordenadas do veículo  $x, y, \psi$  e três coordenadas do efetuador final  $x_e, y_e, \psi_e$  todos expressos no sistema da terra. As coordenadas  $z, \theta, \phi$  são consideradas constantes.

A Fig. C.2 exibe um diagrama esquemático planar que representa o *SVMS*. Neste diagrama, o corpo do veículo submarino é representado pelo elo de distância  $x_{bv}$  entre o centro de gravidade do veículo  $cg$  e a base do manipulador  $bm$ . Por outro lado, a estrutura do manipulador de três graus de liberdade é facilmente observada com as juntas rotativas  $A, B$  e  $C$ .

Entretanto, o diagrama esquemático do sistema está incompleto. Pois, necessita-se da representação do movimento do veículo no plano. Assim, de acordo com a Fig. C.3, para representar este movimento, utiliza-se uma cadeia cinemática virtual com duas juntas virtuais prismáticas e uma junta rotativa (*PPR*), onde, neste caso, as juntas prismáticas  $x_v$  e  $y_v$  representam os movi-

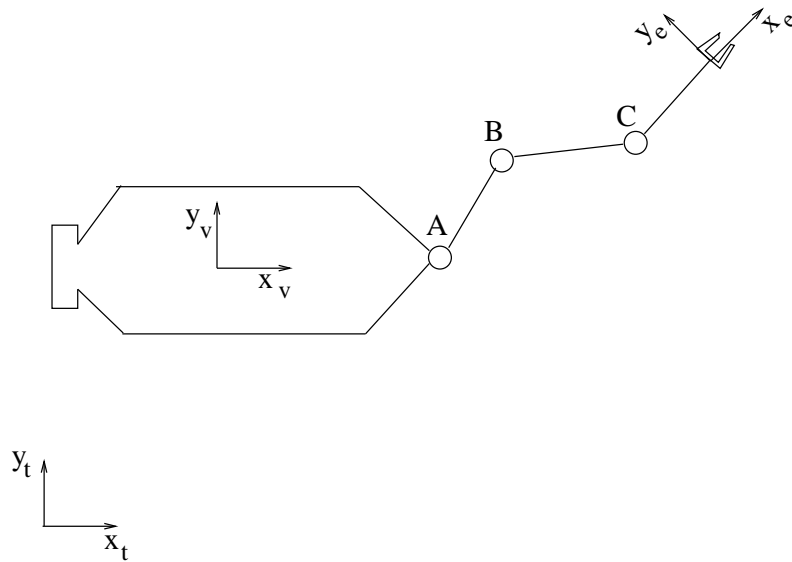


Figura C.1: Estrutura do veículo-manipulador planar.

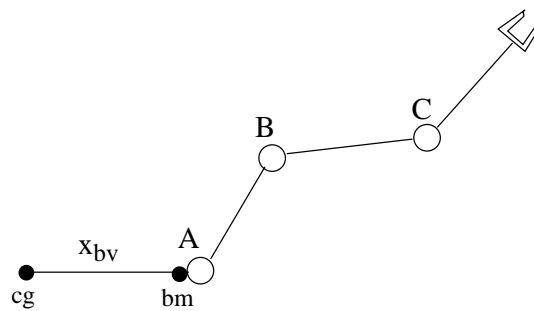


Figura C.2: Diagrama esquemático do *SVM* planar.

mentos de translação e a junta rotacional  $\psi_v$  representa a orientação do centro de gravidade do veículo.

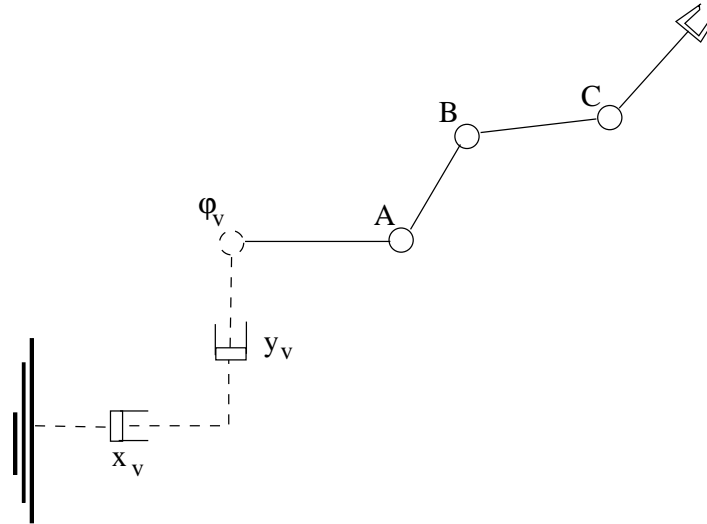


Figura C.3: Diagrama cinemático do veículo-manipulador planar.

Assim como no caso espacial, esta seção baseia-se na modelagem cinemática que relaciona as velocidades do efetuador final e as velocidades das juntas que constituem o sistema robótico. Portanto, o estado cinemático instantâneo  $\dot{\mathbf{x}}$  do efetuador final de um manipulador pode ser expresso em função dos heligiros de cada par cinemático,

$$\dot{\mathbf{x}} = \dot{x}_v + \dot{y}_v + \dot{\psi}_v + \dot{\theta}_A + \dot{\theta}_B + \dot{\theta}_C. \quad (C.1)$$

Como é possível normalizar os  $i$  heligiros e expressar a equação anterior em função dos helicóides normalizados  $\hat{\theta}_i$  e amplitudes dos heligiros  $\Psi_i$ , tem-se que

$$\dot{\mathbf{x}} = \hat{\theta}_{x_v} \Psi_{x_v} + \hat{\theta}_{y_v} \Psi_{y_v} + \hat{\theta}_{\psi_v} \Psi_{\psi_v} + \hat{\theta}_A \Psi_A + \hat{\theta}_B \Psi_B + \hat{\theta}_C \Psi_C. \quad (C.2)$$

Os helicóides normalizados correspondentes as juntas do *SVMS* podem ser obtidos partindo de uma posição de referência para o sistema e de um sistema de coordenadas fixo a cada elo, como 1, 2,..., 6. Uma posição de referência pode ser escolhida arbitrariamente, porém usualmente é escolhida uma posição onde, os eixos das juntas do manipulador sejam facilmente identificados

[Tsai, 1999]. Uma posição de referência para o *SVMS* e os sistemas de coordenadas 1, 2, ..., 6 fixos aos respectivos elos são exibidos na Fig. C.4 onde todos os ângulos das juntas são nulos e os sistemas de coordenadas são paralelos.

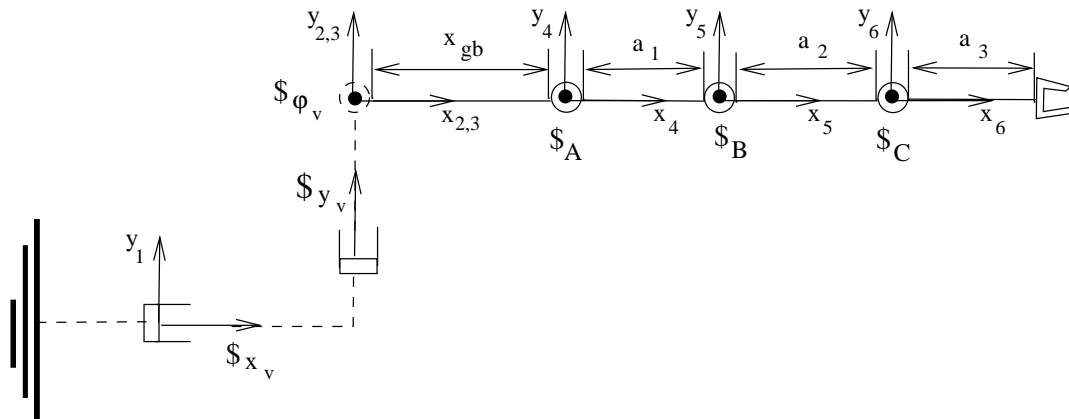


Figura C.4: Posição de referência do *SVMS* planar.

Os helicóides normalizados do sistema são destacados a seguir.

$$\begin{aligned}
{}^1\hat{\$}_{x_v} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^2\hat{\$}_{y_v} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^3\hat{\$}_{\psi_v} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\
{}^4\hat{\$}_A &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^5\hat{\$}_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^6\hat{\$}_C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{C.3}$$

No sentido destes helicóides serem referidos ao sistema de referência do veículo, de forma análoga ao método dos helicóides sucessivos [Tsai, 1999], os mesmos são multiplicados pelas matrizes de transformação apropriadas. Este processo é formulado a seguir.

- Junta prismática  $x_v$  do veículo

$${}^2\hat{\$}_{x_v} = {}^2T_1 {}^1\hat{\$}_{x_v} \tag{C.4}$$

onde:



$${}^2T_1 = \left[ \begin{array}{c|c} [I]_{3 \times 3} & [0]_{3 \times 3} \\ \hline [\mathcal{S}(\vec{{}^2p_1})]_{3 \times 3} & [I]_{3 \times 3} \end{array} \right] \quad (C.5)$$

$$(\vec{{}^2p_1}) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (C.6)$$

- Junta prismática  $y_v$  do veículo

$${}^2\hat{\$}_{y_v} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (C.7)$$

- Junta rotativa  $\psi_v$  do veículo

$${}^2\hat{\$}_{\psi_v} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (C.8)$$

- Junta rotativa  $A$  do manipulador

$${}^2\hat{\S}_A = {}^2T_4 {}^4\hat{\S}_A \quad (C.9)$$

onde:

$$[{}^2T_4] = \left[ \begin{array}{c|c} [{}^2R_4]_{3 \times 3} & [0]_{3 \times 3} \\ \hline \left[ \mathcal{S} \left( {}^2\vec{p}_4 \right) \right]_{3 \times 3} [{}^2R_4]_{3 \times 3} & [{}^2R_4]_{3 \times 3} \end{array} \right] \quad (C.10)$$

$${}^2p_4 = \begin{bmatrix} x_{bv} c_{\psi_v} \\ x_{bv} s_{\psi_v} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (C.11)$$

$${}^2R_4 = \begin{bmatrix} c_{\psi_v} & -s_{\psi_v} & 0 \\ s_{\psi_v} & c_{\psi_v} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (C.12)$$

- Junta rotativa  $B$  do manipulador

$${}^2\hat{\S}_B = {}^2T_4 {}^4T_5 {}^5\hat{\S}_B \quad (C.13)$$

onde:

$$[{}^4T_5] = \left[ \begin{array}{c|c} [{}^4R_5]_{3 \times 3} & [0]_{3 \times 3} \\ \hline \left[ \mathcal{S} \left( {}^4\vec{p}_5 \right) \right]_{3 \times 3} [{}^4R_5]_{3 \times 3} & [{}^4R_5]_{3 \times 3} \end{array} \right] \quad (C.14)$$

$${}^4p_5 = \begin{bmatrix} a_1 c_{\theta_B} \\ a_1 s_{\theta_B} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.15})$$

$${}^4R_5 = \begin{bmatrix} c_{\theta_B} & -s_{\theta_B} & 0 \\ s_{\theta_B} & c_{\theta_B} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.16})$$

- Junta rotativa  $C$  do manipulador

$${}^2\hat{\$}_C = {}^2T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6\hat{\$}_C \quad (\text{C.17})$$

onde:

$$[{}^5T_6] = \left[ \begin{array}{c|c} [{}^5R_6]_{3 \times 3} & [0]_{3 \times 3} \\ \hline \left[ \mathcal{S} \left( {}^5\vec{p}_6 \right) \right]_{3 \times 3} [{}^5R_6]_{3 \times 3} & [{}^5R_6]_{3 \times 3} \end{array} \right] \quad (\text{C.18})$$

$${}^5p_6 = \begin{bmatrix} a_2 c_{\theta_C} \\ a_2 s_{\theta_C} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.19})$$

$${}^5R_6 = \begin{bmatrix} c_{\theta_C} & -s_{\theta_C} & 0 \\ s_{\theta_C} & c_{\theta_C} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.20})$$

De acordo com o plano horizontal  $xy$ , os graus de liberdade associados às coordenadas helicóides  $L, M, R$  são retiradas e assim, tem-se

$$\begin{aligned}
\hat{\$}_{x_v} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, & \hat{\$}_{y_v} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, & \hat{\$}_{\psi_v} &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\
\hat{\$}_A &= \begin{bmatrix} 1 \\ P_{14} \\ Q_{24} \end{bmatrix}, & \hat{\$}_B &= \begin{bmatrix} 1 \\ P_{15} \\ Q_{25} \end{bmatrix}, & \hat{\$}_C &= \begin{bmatrix} 1 \\ P_{16} \\ Q_{26} \end{bmatrix},
\end{aligned} \tag{C.21}$$

onde:

$$\begin{aligned}
P_{14} &= x_{bv} s_{\psi_v}, \\
Q_{24} &= -x_{bv} c_{\psi_v}, \\
P_{15} &= x_{bv} s_{\psi_v} + a_1 s_{\psi_v, \theta_A}, \\
Q_{25} &= -(x_{bv} c_{\psi_v} + a_1 c_{\psi_v, \theta_A}), \\
P_{16} &= x_{bv} s_{\psi_v} + a_1 s_{\psi_v, \theta_A} + a_2 s_{\psi_v, \theta_{A,B}}, \\
Q_{26} &= -(x_{bv} c_{\psi_v} + a_1 c_{\psi_v, \theta_A} + a_2 c_{\psi_v, \theta_{A,B}}).
\end{aligned} \tag{C.22}$$

O equacionamento exibido em (C.22) evidencia que o custo computacional da matriz Jacobiana é bem inferior comparado a formulações convencionais (veja o Apêndice A) encontradas em [Antonelli and Chiaverini, 1998] por exemplo. Entretanto, o Jacobiano mantém um formato retangular, ou seja, redundante. Desta forma, o uso da matriz pseudoinversa pode ainda persistir e para contornar seu uso eventual, a próxima seção utiliza novamente a técnica das cadeias virtuais, no sentido de validar a aplicação da teoria de Davies ao sistema. Pois esta teoria requer cadeias cinemáticas fechadas, onde seus pares cinemáticos sejam modelados por helicóides.

## C.1 Estrutura cinemática do SVMS aplicando o método de Davies

A lei das malhas desenvolvida por Kirchhoff para equacionar circuitos elétricos foi adaptada por Davies para a solução da cinemática de mecanismos de cadeia fechada. Ou seja, no lugar de diferenças de potencial, a teoria de cadeias cinemáticas fechadas requer o uso de helicóides [Davies, 1981]. Assim, como a soma algébrica das diferenças de potencial ao longo de qualquer percurso fechado de um circuito elétrico é zero, a soma das velocidades de um elo com relação a si próprio é nulo [Campos et al., 2003]. Entretanto, para aplicar a teoria de Davies, o sistema robótico veículo-manipulador submarino precisa ser uma cadeia cinemática fechada. Para contornar esta última questão, aplica-se novamente uma cadeia cinemática virtual, a qual não impõe nenhuma restrição adicional ao movimento do efetuador final [Campos et al., 2003]. Assim, esta cadeia cinemática virtual representa o movimento do efetuador final no plano  $xy$  e permite que o sistema robótico veículo-manipulador possa ser disposto como uma cadeia cinemática fechada (vide Fig. C.3).

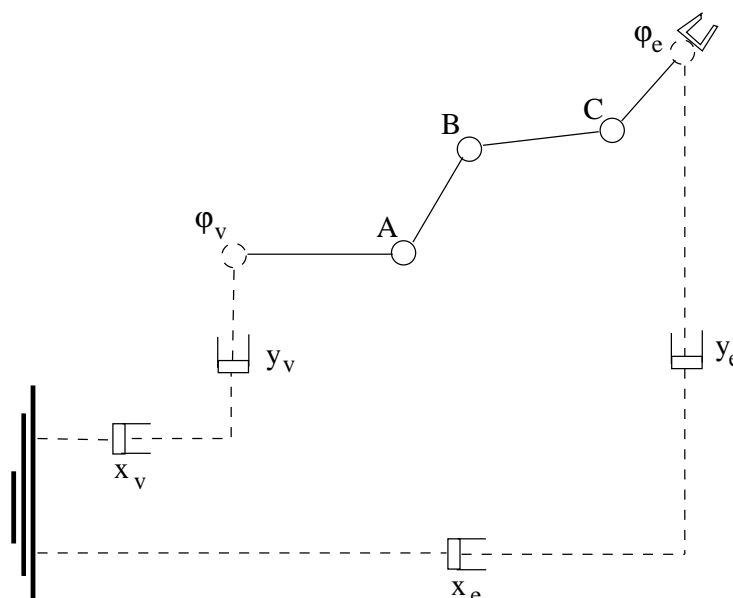


Figura C.5: Sistema veículo-manipulador planar.

Na Fig. C.3, a juntas prismáticas  $x_e$  e  $y_e$  representam os movimentos de translação e a junta

rotacional  $\psi_e$  representa a orientação do efetuador final.

De forma abstrata, a cadeia cinemática da Fig. C.3 pode ser representada por meio de grafos. O grafo é uma ferramenta para obter mais facilmente a relação entre as velocidades das juntas pertencentes a uma cadeia cinemática. No grafo de uma cadeia cinemática fechada todos os nós estão unidos pelas arestas de forma fechada. Impondo uma direção arbitrária a cada uma das arestas do grafo, obtém-se um digrafo. De acordo com a Fig. C.6, cada elo da cadeia cinemática é representado por um nó, enquanto cada par cinemático de um grau de liberdade é representado por uma aresta.

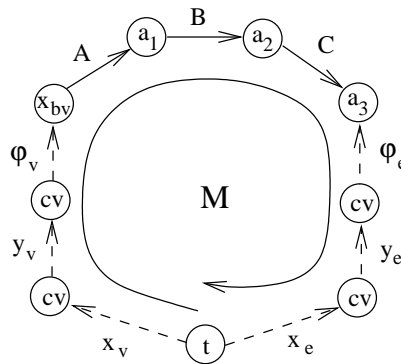


Figura C.6: Digrafo do sistema veículo-manipulador planar

O digrafo pode ser representado matematicamente por uma matriz, denominada de matriz das malhas, exibida a seguir

$$\begin{matrix}
 x_v & y_v & \psi_v & A & B & C & \psi_e & y_e & x_e \\
 [B] = [ & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1]
 \end{matrix} \quad (C.23)$$

Com os pontos destacados anteriormente, torna-se possível formular o movimento do sistema robótico. Esta formulação parte da hipótese que a terra não possui movimento em relação a si mesma. Assim, as velocidades de todas as juntas na cadeia fechada são expressas como,

$$\dot{x}_v + \dot{y}_v + \dot{\psi}_v + \dot{A} + \dot{B} + \dot{C} + \dot{\psi}_e + \dot{x}_e + \dot{y}_e = \vec{0}. \quad (C.24)$$

A equação anterior expressa a lei das malhas adaptada para cadeias cinemáticas fechadas. Esta equação pode ser reescrita da seguinte forma

$$\begin{aligned} \hat{\$}_{x_v} \Psi_{x_v} + \hat{\$}_{y_v} \Psi_{y_v} + \hat{\$}_{\psi_v} \Psi_{\psi_v} + \hat{\$}_A \Psi_A + \hat{\$}_B \Psi_B + \\ + \hat{\$}_C \Psi_C + \hat{\$}_{\psi_e} \Psi_{\psi_e} + \hat{\$}_{x_e} \Psi_{x_e} + \hat{\$}_{y_e} \Psi_{y_e} = \vec{0}. \end{aligned} \quad (C.25)$$

onde  $\hat{\$}_i$  e  $\Psi_i$  correspondem ao helicóide normalizado e a magnitude de velocidade do par cinemático  $i$ , respectivamente. Os helicóides normalizados obedecem ao mesmo procedimento da seção anterior, ou seja, adotam o mesmo sistema de referência fixo ao mesmo corpo virtual e são destacados a seguir

$$\begin{aligned} \hat{\$}_{x_v} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{\$}_{y_v} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \hat{\$}_{\psi_v} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \hat{\$}_A &= \begin{bmatrix} 1 \\ P_{14} \\ Q_{24} \end{bmatrix}, \quad \hat{\$}_B = \begin{bmatrix} 1 \\ P_{15} \\ Q_{25} \end{bmatrix}, \quad \hat{\$}_C = \begin{bmatrix} 1 \\ P_{16} \\ Q_{26} \end{bmatrix}, \\ \hat{\$}_{x_e} &= \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{\$}_{y_e} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad \hat{\$}_{\psi_e} = \begin{bmatrix} -1 \\ P_{19} \\ Q_{29} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (C.26)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 P_{14} &= x_{bv} s_{\psi_v} \\
 Q_{24} &= -x_{bv} c_{\psi_v} \\
 P_{15} &= x_{bv} s_{\psi_v} + a_1 s_{\psi_v, \theta_A} \\
 Q_{25} &= -(x_{bv} c_{\psi_v} + a_1 c_{\psi_v, \theta_A}) \\
 P_{16} &= x_{bv} s_{\psi_v} + a_1 s_{\psi_v, \theta_A} + a_2 s_{\psi_v, \theta_{A,B}} \\
 Q_{26} &= -(x_{bv} c_{\psi_v} + a_1 c_{\psi_v, \theta_A} + a_2 c_{\psi_v, \theta_{A,B}}) \\
 P_{19} &= -(x_{bv} s_{\psi_v} + a_1 s_{\psi_v, \theta_A} + a_2 s_{\psi_v, \theta_{A,B}} + a_3 s_{\psi_v, \theta_{A,B,C}}) \\
 Q_{29} &= x_{bv} c_{\psi_v} + a_1 c_{\psi_v, \theta_A} + a_2 c_{\psi_v, \theta_{A,B}} + a_3 c_{\psi_v, \theta_{A,B,C}}
 \end{aligned} \tag{C.27}$$

A equação de restrição (C.25) pode ser matricialmente expressa por

$$\begin{bmatrix} \hat{\$}_{x_v} & \hat{\$}_{y_v} & \hat{\$}_{\psi_v} & \hat{\$}_A & \hat{\$}_B & \hat{\$}_C & \hat{\$}_{\psi_e} & \hat{\$}_{y_e} & \hat{\$}_{x_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{x_v} \\ \Psi_{y_v} \\ \Psi_{\psi_v} \\ \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_{\psi_e} \\ \Psi_{y_e} \\ \Psi_{x_e} \end{bmatrix} = 0. \tag{C.28}$$

De forma compacta, a forma geral da equação de restrição pode ser reduzida a

$$[N][\Psi] = [0], \tag{C.29}$$

onde,  $N$  é a matriz de rede que contém os heligiros normalizados e  $\Psi$  é o vetor das magnitudes (velocidades) dos heligiros.

O sistema robótico da Fig. C.3 contém seis juntas atuadas, das quais:  $x_e, y_e$  e  $\psi_e$  representam a trajetória que o efetuador final precisa efetuar, enquanto  $x_v, y_v$  são definidas neste trabalho de



forma a coordenar a trajetória do efetuador com a finalidade de evitar possíveis singularidades do manipulador. Este critério de evitar singularidades será posteriormente abordado com mais detalhes.

No sentido de evitar possíveis saturações dos propulsores [Antonelli and Chiaverini, 1998],  $\psi_v$  representa a orientação que o veículo precisa assumir, que neste caso deve ser equivalente a direção da corrente marinha. As juntas passivas são definidas pelas juntas rotativas  $A$ ,  $B$  e  $C$ . Passivas, porque estas juntas são incógnitas que serão obtidas em função das juntas atuadas, destacadas anteriormente.

Portanto, como exposto anteriormente no caso espacial, é possível expressar as juntas secundárias, como uma função das variáveis primárias. Assim, a matriz é reorganizada em duas submatrizes e o vetor de amplitudes subdividido em dois subvetores em função das magnitudes primárias e secundárias.

$$\begin{bmatrix} N_s & N_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_s & \Psi_p \end{bmatrix}^T = 0 \quad (\text{C.30})$$

onde:

$$\begin{aligned} N_p &= [\hat{\$}_{x_v} \ \hat{\$}_{y_v} \ \hat{\$}_{\psi_v} \ \hat{\$}_{\psi_e} \ \hat{\$}_{y_e} \ \hat{\$}_{x_e}] \\ N_s &= [\hat{\$}_A \ \hat{\$}_B \ \hat{\$}_C] \\ \Psi_p &= [\Psi_{x_v} \ \Psi_{y_v} \ \Psi_{\psi_v} \ \Psi_{\psi_e} \ \Psi_{y_e} \ \Psi_{x_e}]^T \\ \Psi_s &= [\Psi_A \ \Psi_B \ \Psi_C]^T. \end{aligned} \quad (\text{C.31})$$

É possível expressar o vetor das velocidades secundárias em função do vetor das velocidades primárias. Assim, reagrupando a equação C.30, tem-se

$$\Psi_s = -[N_s]^{-1} N_p \Psi_p. \quad (\text{C.32})$$

A formulação da aceleração do *SVM* planar é obtida através do mesmo processo utilizado para o caso espacial apresentada no capítulo 5 e tem-se que:

$$\dot{\Psi}_s = - (N_s)^{-1} \left( N_p \dot{\Psi}_p + \dot{N} \Psi \right). \quad (\text{C.33})$$

## C.2 Conclusões

Este apêndice apresentou uma nova forma de modelagem cinemática dos *SVMs* para tornar o problema dimensional associado às técnicas fundamentadas no cálculo das matrizes pseudoinversas. Para tanto, desenvolve-se a modelagem por cadeias cinemáticas virtuais, o que torna possível a aplicação da metodologia de cadeias cinemáticas fechadas de Davies. Assim, observa-se nesta nova proposta que o uso de matrizes pseudoinversas torna-se desnecessário, eliminando a inconveniência dimensional. Tal fato pode ser considerado de elevada relevância diante de um sistema de natureza construtiva tão complexa quanto o *SVMs*.

# Referências Bibliográficas

- [Alexander and Sadiku, 2000] Alexander, C. and Sadiku, M. (2000). *Fundamentals of Electric Circuits*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [Alur et al., 1995] Alur, R., Courcoubetis, C., Halbwachs, N., Henzinger, T., Ho, P., Nicollin, X., Olivero, A., Sifakis, J., and Yovine, S. (1995). The algorithmic analysis of hybrid systems. *Theoretical Computer Science*, 138:3–34.
- [Anderson and Donath, 1990] Anderson, T. and Donath, M. (1990). Animal behaviour as a paradigm for developing robot autonomy. *Theory and Practice from Biology to Engineering and Back*. MIT Press, vol.65:145–168.
- [Antonelli, 2003] Antonelli, G. (2003). *Underwater Robots, Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems*. Springer tracts in advanced robotics.
- [Antonelli and Chiaverini, 1998] Antonelli, G. and Chiaverini, S. (1998). Task-priority redundancy resolution for underwater vehicle-manipulator systems. In *Proceedings - ICRA*, pages 531–536, Leuven. IEEE.
- [Antonelli and Chiaverini, 2003] Antonelli, G. and Chiaverini, S. (2003). A fuzzy approach to redundancy resolution for underwater vehicle-manipulator systems. *Control Engineering Practice*, 11:445–452.
- [Antsaklis et al., 1995] Antsaklis, P., Kohn, W., Nerode, A., and Sastry, S. (1995). *Hybrid Systems II, LNCS*. Springer-Verlag.

- [Antsaklis et al., 1998] Antsaklis, P., Kohn, W., Nerode, A., and Sastry, S. (1998). *Hybrid Systems V, LNCS*. Springer-Verlag.
- [Barreto, 2001] Barreto, J. (2001). *Inteligência artificial no limiar do século XXI*. J.M.Barreto Edições.
- [Beer, 1991] Beer, R. (1991). A biological perspective on autonomous agent design. *Journal of robotics and autonomous systems.*, vol.6:169–186.
- [Campos, 2004] Campos, A. (2004). *Cinemática Diferencial de Manipuladores Empregando Cadeias Virtuais*. PhD thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [Campos et al., 2003] Campos, A., Martins, D., and Guenther, R. (2003). Unified differential kinematics of serial manipulators. In *Proceedings of the X DINAME*.
- [Carrol and Long, 1989] Carrol, J. and Long, D. (1989). *Theory of finite automata*. Prentice-Hall.
- [Cassandras and Lafortune, 1999] Cassandras, C. and Lafortune, S. (1999). *Introduction do Discrete Event Systems*. Kluwer Academic Publishers.
- [Ceccarelli, 2000] Ceccarelli, M. (2000). Screw axis defined by giulio mozzi in 1763 and early studies on helicoidal motion. *Mechanism and Machine Theory*, 35:761–770.
- [Chang, 1989] Chang, P. (1989). Development of a dexterity measure for kinematically redundant manipulators. In *Proceedings American Control Conference*, pages 496–506, Pittsburgh. IEEE.
- [Chiaverini et al., 1997] Chiaverini, S., Siciliano, B., and Egeland, O. (1997). Singularity-robust task-priority redundancy resolution for real-time kinematic control of robot manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13:398–410.
- [Chiaverini et al., 1991] Chiaverini, S., Siciliano, B., and O., E. (1991). Redundancy resolution for the human-arm-like manipulator. *Robotics and Automation Systems*, 8:239–250.

- [Cohen et al., 1997] Cohen, J., Small, C., Mellinger, A., Gallup, J., and Sachs, J. (1997). Estimates of coastal populations. *Science*, 278:1211–1212.
- [Cousineau and Mauny, 1998] Cousineau, G. and Mauny, M. (1998). *The Functional Approach to Programming*. UK: Cambridge University Press.
- [Cox and Wilfong, 1990] Cox, I. and Wilfong, G. (1990). *Autonomous robot vehicles*. Springer-Verlag.
- [Cristi et al., 1991] Cristi, R., Papoulas, F., and Healey, A. (1991). Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane. *IEEE J. Oceanic Engineering*, 15:462–470.
- [Cybenko, 1989] Cybenko, G. (1989). Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Math. Contr. Signals, Syst.*, vol.2:303–314.
- [Davies, 1981] Davies, T. (1981). Kirchhoff’s circulation law applied to multi-loop kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 278:171–183.
- [Davoren and Nerode, 1995] Davoren, J. and Nerode, A. (1995). Logics for hybrid systems. *Proceedings of the IEEE in Hybrid Systems: Theory & Applications*, 88:985–1010.
- [de Silva, 1995] de Silva, C. (1995). *Intelligent control: fuzzy logic applications*. CRC Press LLC.
- [de Wit et al., 1998] de Wit, C. C., Dias, E. O., and Perrier, M. (1998). Robust nonlinear control of an underwater vehicle/manipulator system with composite dynamic. In *Proceedings of IEEE*, pages 531–536, Leuven. IEEE.
- [DeBitetto, 1994] DeBitetto, P. (1994). Fuzzy logic for depth control of unmanned undersea vehicles. In *Proceedings of Symposium of Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pages 233–241.
- [Del Toro, 1994] Del Toro, V. (1994). *Basic Electric Machines*. Prentice-Hall.

- [Desoer and Kuh, 1969] Desoer, C. and Kuh, E. (1969). *Basic Circuit Theory*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [dos Santos, 2003a] dos Santos, C. H. (2003a). Manipulação virtual de robôs manipuladores redundantes. Technical report, Univerdidade Federal de Santa Catarina.
- [dos Santos, 2003b] dos Santos, C. H. (2003b). Manipulação virtual de sistemas veículo-manipulador submarinos. Technical report, Univerdidade Federal de Santa Catarina.
- [dos Santos, 2003c] dos Santos, C. H. (2003c). Singularity avoidance of serial redundant manipulators via unified differential kinematics and a hybrid automaton approach. Technical report, Santa Catarina Federal University.
- [dos Santos et al., 2006a] dos Santos, C. H., Bittencourt, G., Guenther, R., and Pieri, E. D. (2006a). A fuzzy hybrid approach to inverse kinematics of underwater vehicle-manipulator systems. In *8th International Symposium on Robot Control*, Italy.
- [dos Santos et al., 2006b] dos Santos, C. H., Bittencourt, G., Guenther, R., and Pieri, E. D. (2006b). A fuzzy hybrid singularity avoidance for underwater vehicle-manipulator systems. In *12th IFAC Symposium on Information Control Problem in Manufacturing*, France.
- [dos Santos et al., 2006c] dos Santos, C. H., Bittencourt, G., Guenther, R., and Pieri, E. D. (2006c). Motion coordination for underwater vehicle-manipulator systems using a fuzzy hybrid strategy. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, China.
- [dos Santos et al., 2006d] dos Santos, C. H., Bittencourt, G., Guenther, R., and Pieri, E. D. (2006d). Redundancy resolution for underwater vehicle-manipulator systems using a fuzzy expert system. In *IEEE International Conference on Control Applications*, Germany.
- [dos Santos et al., 2006e] dos Santos, C. H., Bittencourt, G., Guenther, R., and Pieri, E. D. (2006e). Singularity avoidance in redundat robots using hybrid automaton. In *IEEE International Conference on Control Applications*, Germany.

- [dos Santos et al., 2006f] dos Santos, C. H., Bittencourt, G., Guenther, R., and Pieri, E. D. (2006f). Virtual kinematic chains to solve the underwater vehicle-manipulator systems redundancy. *Brazilian Journal of Mechanical Sciences*, XXVIII:354–362.
- [dos Santos et al., 2005a] dos Santos, C. H., Guenther, R., Martins, D., and Pieri, E. D. (2005a). Comparative analysis of methods for redundancy solution of underwater vehicle-manipulator systems. In *International Congress of Mechanical Engineering*, Brazil.
- [dos Santos et al., 2005b] dos Santos, C. H., Guenther, R., Martins, D., and Pieri, E. D. (2005b). Inverse kinematics of the underwater vehicle-manipulator systems using kinematic constraints. In *IEEE Int. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics*, Poland.
- [dos Santos et al., 2006g] dos Santos, C. H., Guenther, R., and Pieri, E. D. (2006g). A reactive neural network to redundancy resolution for underwater vehicle-manipulator systems. In *International Conference on Robotics & Automation*, USA.
- [Downing, 2002] Downing, D. (2002). *Quality Indices for Robot Manipulators*. PhD thesis, The University of Melbourne.
- [Duarte, 2002] Duarte, F. (2002). Pseudoinverse trajectory control of redundant manipulators: a fractional calculus perspective. In *Pseudoinverse trajectory control of redundant manipulators: a fractional calculus perspective*.
- [Engell and Sivan, 2004] Engell, S. and Sivan, R. (2004). *Modeling, Analysis and Design of Hybrid Systems*. Springer-Verlag, LNCS.
- [Fitzgerald et al., 1971] Fitzgerald, A., Kingsley, C., and Kusko, A. (1971). *Electric Machinery*. McGraw Hill.
- [Fossen, 1998] Fossen, T. (1998). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons.
- [Goheen and Jeffery, 1990] Goheen, K. and Jeffery, R. (1990). Multivariable self-tuning autopilots for autonomous and remotely operated underwater vehicles. *Oceanic Engineering*, 15:144–151.

- [Guo et al., 2003] Guo, J., Chiu, F., and Huang, C. (2003). Design of a sliding mode fuzzy controller for the guidance and control of an autonomous underwater vehicle. *Oceanic Engineering*, 18:327–339.
- [Healey and Lienard, 1987] Healey, A. and Lienard, D. (1987). Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles. *Oceanic Engineering*, 18.
- [Hootsmans and Dubowsky, 1993] Hootsmans, N. and Dubowsky, S. (1993). Control of mobile manipulators including vehicle dynamic characteristics. Technical report, Massachusetts Institute of Technology.
- [Hunt, 1987] Hunt, K. (1987). Robot kinematics - a compact analytic inverse solution for velocities. *Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 109:42–49.
- [Hunt, 2000] Hunt, K. (2000). Don't cross-thread the screw. In *Proceedings of Ball 2000 Conference*, pages 1–37.
- [Jamshidi, 1993] Jamshidi, M. (1993). *Fuzzy logic and control: software and hardware applications*. Prentice-Hall, Inc.
- [Kato, 1995] Kato, N. (1995). *Applications of fuzzy algorithm to guidance and control of underwater vehicles*. J.Yuh (Ed.).
- [Khalil, 2002] Khalil, H. (2002). *Nonlinear systems*. Prentice Hall.
- [Klein and Hunag, 1983] Klein, C. and Hunag, C. (1983). Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant manipulators. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 13:245–250.
- [Kosko, 1992] Kosko, B. (1992). *Neural networks and fuzzy systems*. Prentice-Hall.
- [Kosow, 1996] Kosow, I. (1996). *Máquinas Elétricas e Transformadores*. Editora Globo.



- [Mahesh et al., 1991] Mahesh, M., Yuh, J., and Lakshmi, R. (1991). A coordinated control of an underwater vehicle and robotic manipulator. *Robotic Systems on Underwater Robotics*, 8:339–370.
- [Martins, 2001] Martins, D. (2001). *Hierarchical Analysis of Robot Manipulators*. PhD thesis, Univerdidade Federal de Santa Catarina.
- [McLain et al., 1992] McLain, T., Rock, S., and Lee, M. (1992). Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system. *Underwater Robotics*, 8:139–158.
- [Mendel, 1995] Mendel, J. (1995). Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. *Proc. IEEE*, 83:345–377.
- [Murray et al., 1994] Murray, R., Li, Z., and Sastry, S. (1994). *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- [Nakamura and Hanafusa, 1981] Nakamura, Y. and Hanafusa, H. (1981). Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control. *Transactions ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control*, 108:163–171.
- [Nakamura et al., 1987] Nakamura, Y., Hanafusa, H., and Tsuneo, Y. (1987). Task-priority based redundancy control of robot manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 6:447–459.
- [Nakamura and Savant, 1992] Nakamura, Y. and Savant, S. (1992). Nonlinear tracking control of autonomous underwater vehicles. In *Proceedings of Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages A4–A9.
- [Nascimento and Yoneyama, 2000] Nascimento, J. and Yoneyama, T. (2000). *Inteligência Artificial*. Edgard Blücher LTDA.
- [Nenchev, 1989] Nenchev, D. N. (1989). Redundancy resolution through local optimization: A review. *Journal of Robotic Systems*, 6:769–798.

- [Park and Yang, 2002] Park, T.-S. and Yang, H.-S. (2002). A study on singularity avoidance and robust control of redundant robot. In *Proceedings of 4<sup>o</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 1687–1691.
- [Passino and Yurkovich, 1998] Passino, K. and Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy control*. Addison Wesley.
- [Petrobras, 2004] Petrobras (2004). Exploração submarina. <http://www.petrobras.com.br>.
- [Rojas et al., 2000] Rojas, B., Hsu, L., and Lizarralde, F. (2000). Controle coordenado de um sistema robótico veículo-manipulador. In *Proceedings of the CBA*.
- [Russell and Norving, 2003] Russell, S. and Norving, P. (2003). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall Series in Artificial Intelligence.
- [Salisbury and Craig, 1982] Salisbury, J. and Craig, J. (1982). Articulated hands: force control and kinematics issues. *International J. Robotics Res.*, 1:4–17.
- [Sandri and Correa, 1999] Sandri, S. and Correa, C. (1999). Lógica nebulosa. In *V Escola de Redes Neurais*, pages 73–90. ITA.
- [Schjolberg and Fossen, 1995] Schjolberg, I. and Fossen, T. (1995). Modelling and control of underwater vehicle-manipulator systems. Technical report, University of Trondheim.
- [Sciavicco and Siciliano, 1996] Sciavicco, L. and Siciliano, B. (1996). *Modeling and Control of Robot Manipulators*. McGraw-Hill.
- [Selmié and Lewis, 2000a] Selmié, R. and Lewis, F. (2000a). Deadzone compensation in motion control systems using neural networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.45:602–613.
- [Selmié and Lewis, 2000b] Selmié, R. and Lewis, F. (2000b). *Neural network approximation of piecewise continuous functions: Application to friction compensation*. Soft Computing and Intelligent Systems: Theory and Applications.

- [Shaft and Schumacher, 2000] Shaft, A. and Schumacher, H. (2000). *An Introduction to Hybrid Dynamical Systems*. Springer-Verlag.
- [SNAME, 1950] SNAME (1950). *Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid*. Technical and Research Bulletin.
- [Strang, 1988] Strang, G. (1988). *Linear Algebra and it's applications*. McGraw-Hill.
- [Tabaai et al., 1994] Tabaai, S., El-Hawary, F., and El-Hawary, M. (1994). Hybrid adaptative control of autonomous underwater vehicle. In *Proceedings of Symposium of Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pages 275–282.
- [Takagi and Sugeno, 1985] Takagi, T. and Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to model and control. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 15:116–132.
- [Tomlin et al., 2000] Tomlin, C., Mitchell, I., and Ghosh, R. (2000). A game theoretic approach to controller design for hybrid systems. *Proceedings of the IEEE in Hybrid Systems: Theory & Applications*, 88:949–970.
- [Tsai, 1999] Tsai, L.-W. (1999). *Robot Analysis, The mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. ohn Wiley & Sons Publication.
- [Vincent and Grantham, 1997] Vincent, T. and Grantham, W. (1997). *Nonlinear and Optimal Control Systems*. John Wiley & Sons, Inc.
- [Voglewede, 2004] Voglewede, P. (2004). *Measuring Closeness to Singularities of Parallel Manipulators with Application to the Design of Redundant Actuation*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology.
- [Wampler, 1986] Wampler, C. (1986). Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least-square methods. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, 16:93–101.

- [Wang, 1992] Wang, L.-X. (1992). Fuzzy systems are universal approximators. In *Proceedings of 1st IEEE Conf. on Fuzzy Systems*, pages 1163–1170.
- [Yoerger and Slotine, 1985] Yoerger, D. and Slotine, J. (1985). Robust trajectory control of underwater vehicles. *Oceanic Engineering*, 10:462–470.
- [Yoshikawa, 1987] Yoshikawa, T. (1987). Manipulability of robotic mechanisms. *International Journal of Robotics Research*, 4.
- [Yoshio and Xiaoping, 1994a] Yoshio, Y. and Xiaoping, Y. (1994a). Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator. *IEEE Trans. Aut. Contr.*, 39:1325–1332.
- [Yoshio and Xiaoping, 1994b] Yoshio, Y. and Xiaoping, Y. (1994b). Effect of the dynamic interaction on coordinated control of mobile manipulators. *IEEE Trans. Aut. Contr.*, 39.
- [Yuh, 1990] Yuh, J. (1990). A neuralnet controller for underwater robotic vehicles. *IEEE J. Oceanic Engineering*, 15:161–166.
- [Yuh, 1992] Yuh, J. (1992). Modeling and control of underwater robotic vehicles. In *Trans. Sys. Man and Cyber.*, pages 1475–1483. IEEE.
- [Yuh, 1994] Yuh, J. (1994). Learning control of underwater robotic vehicles. *IEEE Control System Magazine*, 14:39–46.
- [Yuh, 1996] Yuh, J. (1996). An adaptative and learning control system for underwater robots. In *Proceedings of 13th World Congress International Federation of Automatic Control*, pages 145–150.
- [Yuh, 2000] Yuh, J. (2000). Design and control of autonomous underwater robots: A survey. *Oceanic Engineering*, 8:7–24.
- [Zadeh, 1965] Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Inform. Control*, vol.8:338–353.
- [Zadeh, 1973] Zadeh, L. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol.3:28–44.